

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(一)

佳作

052317

雙轉子反向相對運動對感應電動勢影響之研究

學校名稱： 臺北市立松山高級中學

作者： 高二 魏浩庭 高二 魏浩恩	指導老師： 楊志豪 魏志鴻
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞： 切割磁力線反向相對運動(Cutting
Magnetic Lines of Force to Reverse Relative
Motion)、感應電動勢(Induced Electromotive Force)、
偉伯費希納定律 (Weber Fechner Law)對數數學模
型

雙轉子反向相對運動對感應電動勢影響之研究

摘要

本研究針對傳統單轉子發電機效能不彰能量嚴重耗損，提出創新雙轉子技術以提升發電效率降低能源浪費。核心設計為雙轉子反向旋轉結構，透過相對運動提升角速度與磁場變化，增強感應電動勢生成。透過對比實驗，證實雙轉子結構較單轉子提升 1.4 倍感應電動勢，參考 Weber-Fechner Law 建立對數數學模型，描述電動勢與旋轉參數之非線性關係。

$$\varepsilon = N * B * A * \sin\theta * \omega * 2^{[(\frac{3}{4}) * (n+1)]}$$

ε : 電動勢 N : 線圈匝數 B : 磁場強度 A : 線圈面積

θ : 線圈面與磁場夾角 ω : 轉動角速度 n : 轉子相對運動之倍數

同步研發雙轉子架構展現穩定性與模組化彈性擴充，具備取代傳統發電機潛力，適用於分散式發電與再生能源領域，展現高效、緊湊且具實用價值之創新應用電力生成技術方案。

壹、研究動機

自工業革命以來，人類社會迅速發展，對能源的需求也急劇上升，化石燃料如煤、石油與天然氣被大量開採與使用。然而，這些能源不僅屬於不可再生資源，遲早會面臨枯竭，更嚴重的是，其燃燒過程會排放大量二氧化碳與其他溫室氣體，加速全球暖化現象，進而引發極端氣候，天災頻傳，對人類與自然生態造成重大威脅。面對資源逐漸耗盡與環境惡化的雙重挑戰，世界各國不得不重新思考能源使用的未來方向。

現代社會的生活幾乎無法脫離電力的支援。電力不僅驅動家庭日常所需，如照明、冷氣、電器等，也是工業運作、醫療系統、資訊科技等重要領域的基礎。因此，如何穩定且高效地取得電力，是每個國家必須面對的重要課題。

目前除太陽能透過光電效應直接將光能轉為電能外，多數發電方式仍需仰賴「發電機」這個核心裝置來進行能量轉換。不論是火力、核能、風力、水力還是地熱與潮汐發電，其原理多是利用流體（如水、蒸氣或空氣）動能推動渦輪葉片旋轉，再帶動發電機產生電能，運用的正是電磁感應的原理。可見發電機的效能直接影響整體發電效率與能源使用成果。

傳統的單轉子發電機發電效率已遇瓶頸，提升反向相對運動切割磁力線將是大幅提升發電機效能的關鍵。因此，研發新型高效能的發電機，不僅能提升電能轉換效率，還能大幅降低發電成本，對於家庭用電與工業用電皆有助益。其中具潛力的構想是開發「運用史坦利效應的雙轉子發電機」，史坦利效應指的是在特定條件下，轉動部件間所產生的特殊電磁交互作用，能提升發電效率，若能透過雙轉子的設計，即在發電機中加入兩組相對反向旋轉的轉子，並藉由電磁感應互相強化磁通變化，將可能進一步提升電能輸出，減少能量損耗。這樣的發電機若能成功研發，將有望提供穩定、低成本且環保的電力來源。

貳、研究目的

本次專題研究旨在針對史坦利效應的高效率新式發電機組，深入探究其提升發電效率的數學模型，研發模組化彈性適用機構，將發電機組建置任何流體動能發電裝置，故我們設定需完成下列目的：

- 一、設計多模式運轉系統模組。
- 二、製作出可信賴的測量治具。
- 三、測試內外轉子對發電效能影響狀況。
- 四、研究雙轉子發電機的數學模型。
- 五、研發雙轉子發電機組替換傳統單轉子發電機之適用性。

參、研究設備及器材

表 1 研究設備及器材表

			
水泥電阻測量治具 (本圖由指導教師拍攝)	齒輪 (本圖由指導教師拍攝)	陶瓷培林 (本圖由指導教師拍攝)	直流發電機 (本圖由指導教師拍攝)
			
支架 (本圖由指導教師拍攝)	Agilent34970A 電壓、電流計 (本圖由指導教師拍攝)	大型環境風洞 (央大) (本圖由指導教師拍攝)	阻流型葉扇 (本圖由指導教師拍攝)
			
直流轉速控制器 (本圖由作者拍攝)	直流 CG、SG 發電機 (本圖由作者拍攝)	測量治具及量測電表 組(本圖由作者拍攝)	MRLTH-041 直流供 應(本圖由指導教師拍攝)
			
直流馬達 (模擬動力源) (本圖由作者拍攝)	CG 測試裝置 (本圖由作者拍攝)	11SG 測試裝置 (本圖由作者拍攝)	22 SG 測試裝置 (本圖由作者拍攝)
			
多模式電壓電流測試 端子(本圖由指導教師拍攝)	10W500Ω 陶瓷電阻 (本圖由作者拍攝)	示波軟體 (本圖由指導教師拍攝)	33 SG 測試裝置 (本圖由作者拍攝)

肆、研究流程

一、研究科學發展史，發現科學發展有一個規律的步驟(如下圖 1)：所有科學發展一開始都是有意無意的發現某種現象，接著科學家進行此現象的變因研究，之後便需要建立數學模型以堅實理論之扎實性，近代場論及量子力學的發展，更為科學提供深層次的理論解釋。

科學發展流程

1. 現象的發現

例：慣性 --- 伽利略
火星逆行 --- 托勒密
電磁效應 --- 厄斯特

2. 變因的研究

例：行星運動定律 --- 克普勒
牛頓運動定律 --- 牛頓
電磁感應定律 --- 法拉第

3. 數學式發展

例：行星運動定律 --- 克普勒
牛頓第二運動定律 --- 牛頓
電磁感應定律 --- 法拉第
電磁方程式 --- 馬克士威

4. 原理的解釋

例：量子場論
重力場論
電磁力場論

圖 1 科學發展流程(本圖由作者製作)

二、本專題研究系統性計畫：

我們希望學習歷史上之科學家，遵循上述科學發展史步驟，研究建立數學模型，再更進一步研發此理論之科技應用(如下圖 2)，完成從理論研究到實用研發。

雙轉子反轉式發電機 科學研究、科技研發 系統性計畫

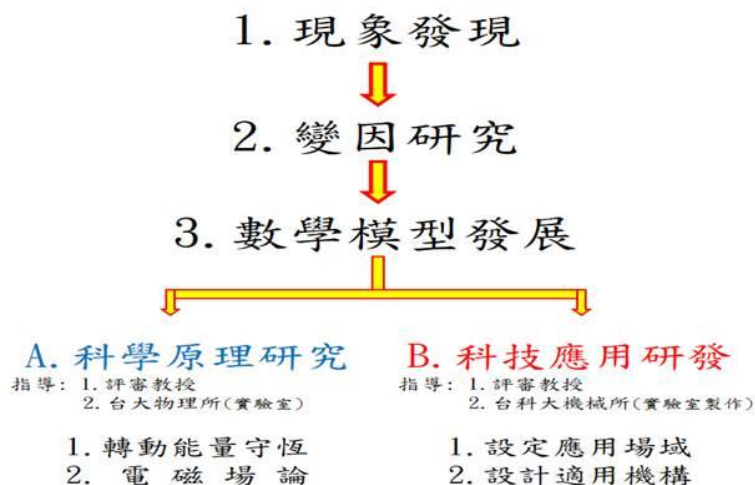


圖 2 本專題研究系統性發展流程(本圖由作者製作)

三、本專題研究實驗及數學模型發展流程：

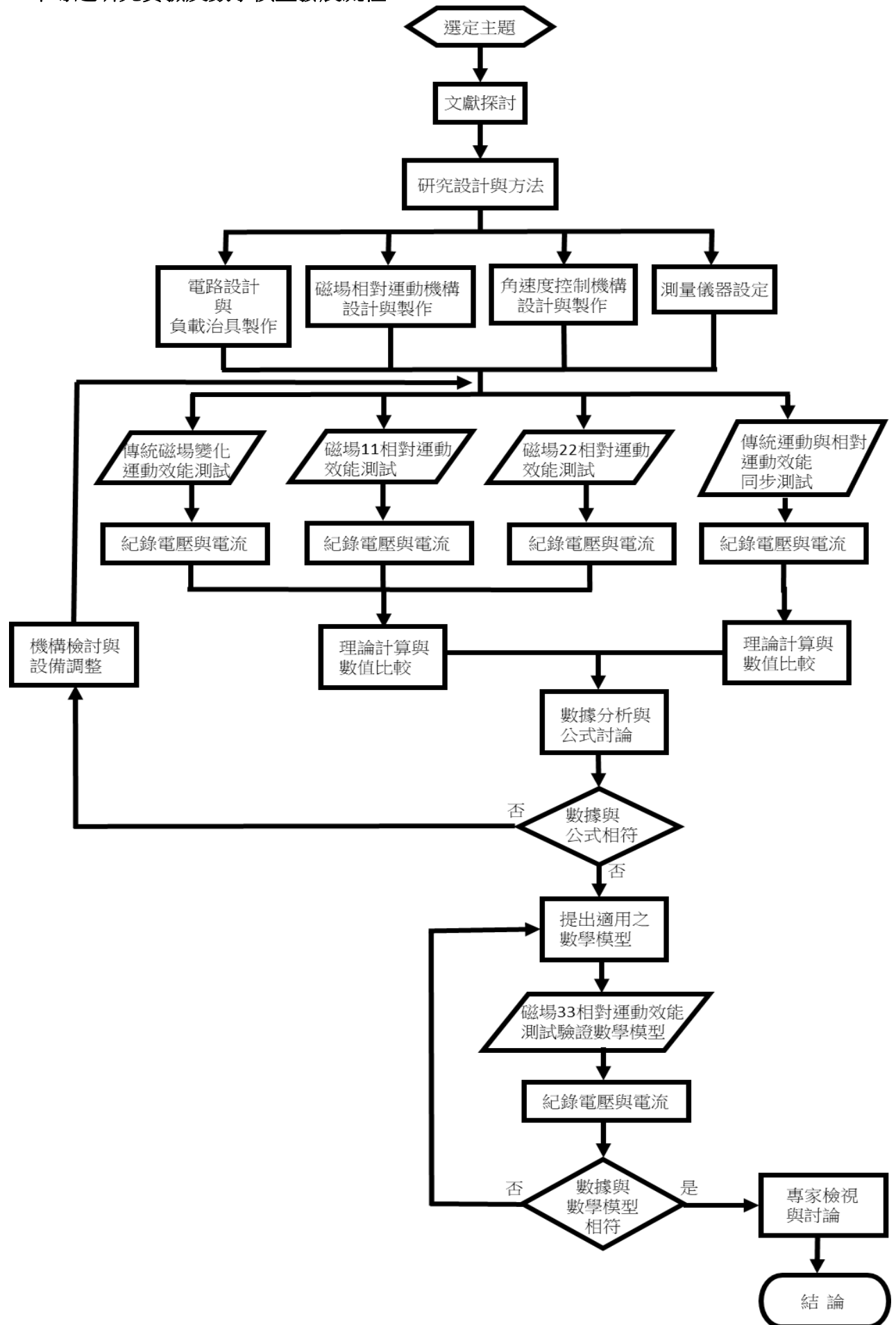


圖 3 本專題研究實驗及數學模型發展流程(本圖由作者製作)

伍、名詞定義與解釋

CG : Common Generator 傳統型單轉子發電機。



圖 4 外轉子發電機及結構示意圖(左圖片引自鵬凡科藝網站，右圖由作者製作)



圖 5 內轉子發電機及結構示意圖(左圖由指導教師拍攝，右圖由作者製作)

SG : Stanley Generator 新發明雙轉子高效發電機。

DSG : Double Stanley Generator 並聯型新發明雙轉子高效發電機。

FdL : Faraday's Law 法拉第電磁感應定律。

SRM : Stanley's Rotation Movement 內外轉子相互反向旋轉的相對運動。

SE : Stanley Effect 因 SRM 所產生的電能提升的效應。

11SG : 內外轉子轉速，各自為動力軸轉速的 1 倍的 SG 設定。

22SG : 內外轉子轉速，各自為動力軸轉速的 2 倍的 SG 設定。

33SG : 內外轉子轉速，各自為動力軸轉速的 3 倍的 SG 設定。

陸、研究過程

研究一、多模式同步發電機運轉系統模組之設計與實驗模式之選定

本研究旨在設計並製作一套多模式同步發電機（SG）運轉系統模組，藉由分析與模擬不同機組構型，以提供後續性能測試與實驗評估之基礎。具體研究內容如下：

1. 轉動模式分析

針對各型同步發電機組之轉子與定子進行運轉模式分析，包含其旋轉方向、耦合方式與運動特性，藉以建立各構型在實際運作條件下之動態行為模型。

2. 三維構型建模與結構設計

應用三維電腦輔助設計（3D CAD）軟體，繪製各式同步發電機運轉機構之構型圖，並針對 CG、11SG、22SG 及 33SG 等四種運轉模式進行詳細結構設計，確立其模組間之連接與轉動關係。

3. 模組製作與實驗準備

根據所設計之構型與結構圖，實際製作出各模式之運轉模組實體，作為後續性能測試與實驗研究之基礎平台。

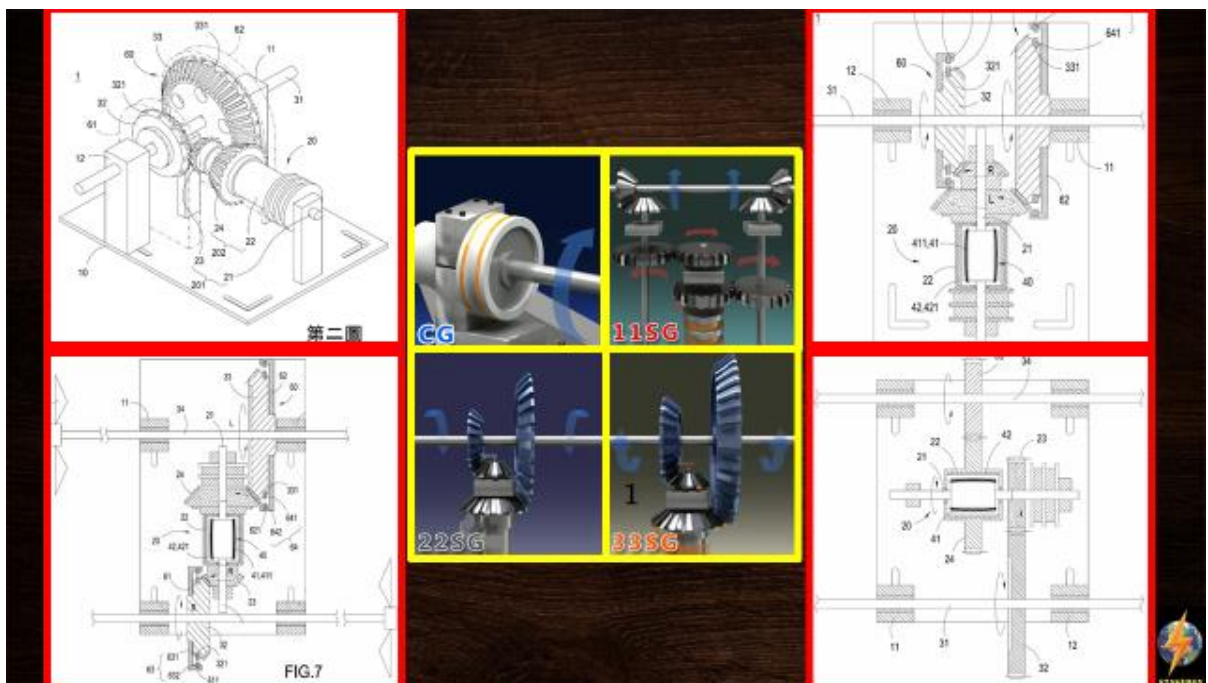


圖 6 SG 機構方案設計與篩選(本圖由作者製作)

研究二、測量治具之製作與「信賴度」測試實施

本研究第二部分旨在開發一套具備可重複性與高可信度之電性量測治具，並透過實驗驗證其在不同電壓輸入條件下之穩定性與可靠性。測試方法係根據歐姆定律（Ohm's Law）進行理論與實測值之比較，以評估其「信賴度」表現。

(一)信賴度測試原理

量測治具之可信度評估係根據歐姆定律公式： $V = I \times R$

其中，輸入已知固定值之電壓 V ，透過量測實際輸出電流 I ，並與理論計算值 V/R 比較，以評估負載電阻於不同電壓條件下之穩定性。當實測電流與理論值間誤差極小，即可認定該量測治具具備良好之可信度。

(二)測量治具設計與構成

為確保負載穩定性，特別設計並製作如下電性測試治具：

1. 自製負載電路治具設計

設計一套專用檢測治具，作為電性測試用之標準負載，其結構與配置詳如圖 7 示。

2. 電阻配置

選用四支 200 歐姆水泥電阻，以並聯方式配置，形成等效電阻 50 歐姆。再將相同配置之另一組串聯接入，使整體負載構成等效 100 歐姆電阻，如圖 9 所示。

3. 實測電流值與理論值對比

將設計完成之負載治具接入直流電源，施加固定電壓後，以電流量測其實際輸出電流，並與依據歐姆定律計算所得之理論電流值進行比較以判定其電性穩定性如圖 10 示。

4. 重複測試與數據紀錄

透過三用電表進行多次測試，觀察不同次數下水泥電阻負載治具的輸出變異，以統計方式評估其可信度表現。所有測試結果與數據如圖 10 所示。

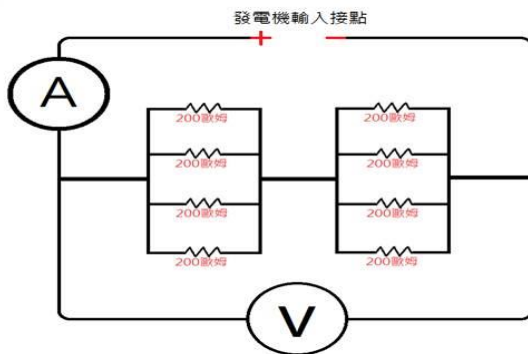


圖 7 水泥電阻負載治具設計圖(本圖由作者製作)



圖 8 水泥電阻負載治具(本圖由指導教師拍攝)



圖 9 水泥電阻負載治具(本圖由作者拍攝)



圖 10 水泥電阻負載治具(本圖由作者拍攝)

研究三、史坦利效應之發電效能驗證實驗

----- 內、外轉子反向相對運動之轉速對發電效能改變之測試

本研究第三部分旨在驗證「史坦利效應」(Stanley Effect)，即內、外轉子具反向相對運動之結構對同步發電機 (SRM) 發電效能之影響。透過系統性實驗設計，評估轉速變化對不同結構同步發電機發電效能的具體影響，進而分析各種構型在相同動力輸入條件下之性能表現。

(一) 實驗目的

為釐清內外轉子反向運動對同步發電效能的實質影響，設計本組實驗，並同時比較四種不同構型 (CG、11SG、22SG、33SG) 發電機在相同轉速條件下的輸出表現。

(二) 實驗設計與設備配置

1. 小型同步發電機製作

依據實驗空間與操作便利性需求，特製作小型直流同步發電機 (SG)，以作為各構型樣機之標準，如圖 11 所示。

2. 模擬動力源配置

選用大型直流馬達作為模擬動力源，提供穩定、可控制之轉速輸入條件。

3. 構型併聯與同步測試條件

將 CG、11SG、22SG 與 33SG 四種同步發電機構型以併聯方式連接於同一動力軸，並在相同轉速條件下進行同步性能測試。

4. 電路負載設計

以四顆 10W 500 Ω 陶瓷電阻並聯配置，形成等效 40W 125 Ω 之穩定電性負載，作為發電輸出端之標準負載。

5. 量測設備與記錄系統

每組發電機配置兩個數位電表，分別量測其輸出之電壓與電流，以提供即時量測資料。另搭配 Sony MW-1 裝置進行測試過程之同步視頻記錄，利於後續數據對照與驗證。

6. 測試次數與資料收集

於每一轉速條件下 (以 rpm 為單位) 進行六次重複測試，以增強結果的穩定性與信賴度。每次測試中，紀錄轉速、電壓與電流等三項數據，各取樣 12 筆資料作為分析資料。

7. 數據處理與分析方法

所有實驗數據以影像同步擷取方式取得，並使用 Microsoft Office Excel 軟體進行後續數據處理。於分析過程中，先將數據依數值大小進行降冪排序，再剔除偏離兩個標準差之外之極端值，以確保數據分布之穩定性與收斂性。最終取其平均值作為每次測試結果，以提升分析結果之效度與可信度。



圖 11 同步測試 CG、11SG、22SG、33SG 發電效能 裝置圖(本圖由作者拍攝)

柒、研究結果與分析

結果一、多模式運轉系統模組設計及選定

本研究依據不同同步發電機（SG）運轉構型，應用三維電腦輔助設計（3D CAD）軟體進行模組化設計與建模，繪製出各類 SG 運轉系統模組之結構圖，如圖 12 所示。

每一構型皆考量轉子與定子間之運動模式、結構穩定性與可製造性，完成設計後製作成實體樣機，進行組裝與初步運轉測試。

經過多輪測試與比對，針對模組之結構完整度、運轉穩定性、發電效率與維護便利性等因素進行評估，最終選定性能最優之運轉構型作為後續發電效能測試與應用研究之標準模組。

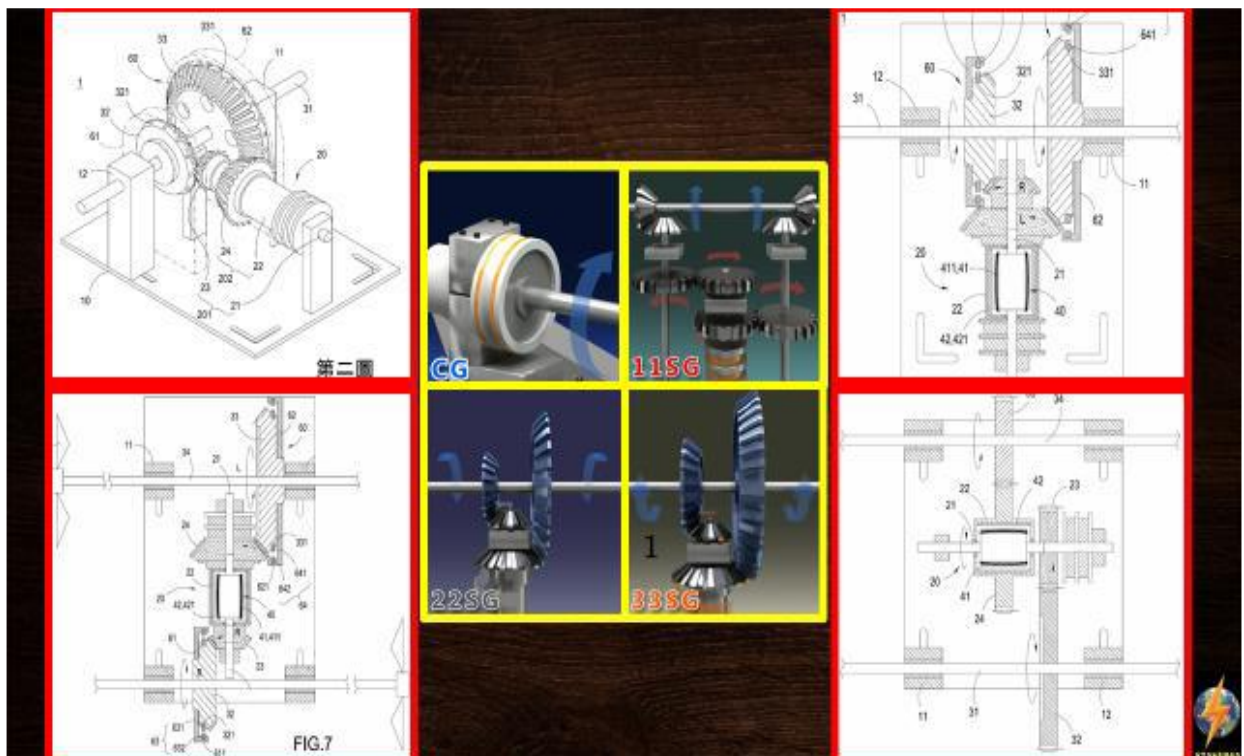


圖 12 SG 機構方案設計與篩選(本圖由作者製作)

結果二、製作測量治具並實施「信賴度」測試

本研究針對自製量測治具進行「信賴度」測試，驗證其在不同電壓輸入條件下之輸出穩定性與理論符合性。測試原理係依據歐姆定律：

$$V = I \times R$$

於實驗中，輸入多組定值直流電壓，實際量測輸出電流，並與由歐姆定律推算之理論電流值進行比較。以此判斷負載電阻之穩定性及整體量測系統之可信程度。

測試結果顯示，在各項固定電壓輸入條件下，量測電流與理論電流之誤差率皆小於 5%，詳列於表 2。換言之，測試數值與理論預期吻合率均超過 95%，具高度準確性。此外，將測試所得之電壓-電流數據繪製成關係圖，並與理論值繪製之線性趨勢圖進行比對（如圖 13 所示），其中：

- **圖 13 綠線：**實際量測電流值之線性變化趨勢
- **圖 13 黃線：**依據歐姆定律推算之理論電流值趨勢線

兩線條於各測試點之間高度重疊，顯示自製電流負載治具具備良好之線性響應特性與穩定輸出能力，具高度信賴度與應用價值，足以支援後續各項發電機測試實驗之電性參數量測。

表 2 負載治具可信度表現

電阻值	輸入電壓(V)	輸出電流(mA)	輸出電流(理論值)	誤差率
100	50	480	500	-0.04
100	100	960	1000	-0.04
100	150	1480	1500	-0.014
100	200	1930	2000	-0.035

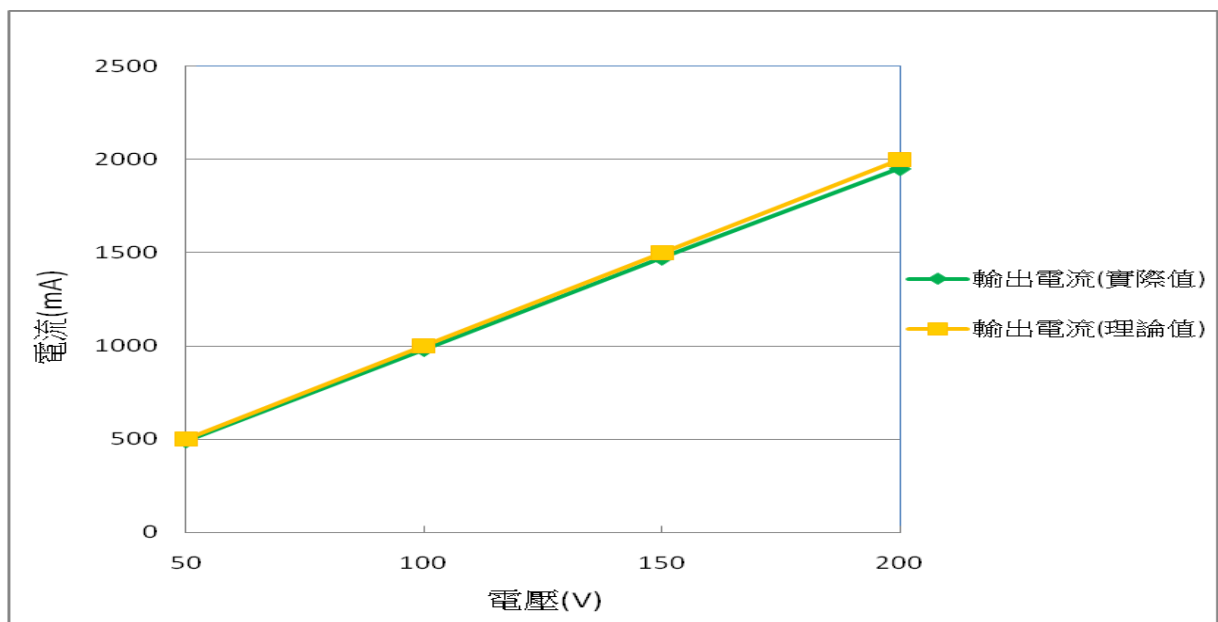


圖 13 負載治具可信度表現折線圖(輸出電流實際值與輸出電流理論值比較)(本圖由作者製作)

結果三、史坦利效應效能驗證

----- 內、外轉子反向相對運動之轉速對發電效能改變之測試

發電效能斜率分析與比較

為探討不同構型同步發電機在相同動力輸入條件下之發電效能差異，進一步採用斜率分析法進行比較。斜率定義如下： $m = \Delta Y / \Delta X$

其中， ΔY 為輸出電壓之變化量， ΔX 為對應之轉速變化量。此斜率即代表在單位轉速變化下所產生的電壓變化程度，亦可作為衡量發電效能敏感度之指標。

實驗結果顯示，在相同動力軸轉速輸入條件下，發電軸雙轉子進行相對運動（即 SRM）之相對轉速越大者，其輸出電壓對應轉速變化之斜率越大，顯示其發電效能越佳。以圖 14 為例，代表 33SG 之黃色趨勢線斜率明顯大於代表 CG 構型之藍色線段，說明在相同轉速下，33SG 能產生較高之輸出電壓，與 CG 構型間之效能差距亦更為顯著。

由此可得，在相同動力輸入條件下，透過提升發電軸雙轉子間之相對轉速，可有效提升整體發電效能，驗證史坦利效應在本系統中之實用性與有效性。

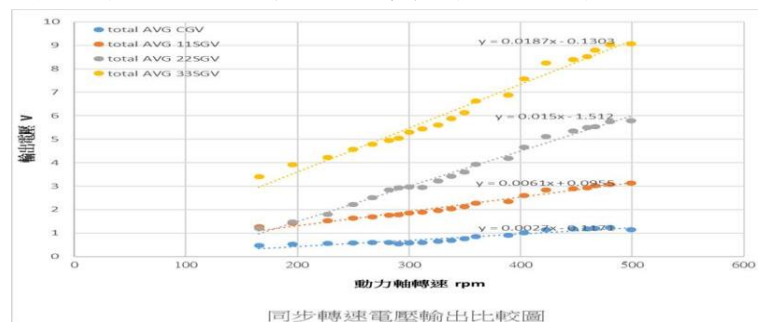


圖 14 CG、11SG、22SG、33SG 轉速同步電壓輸出分布圖(本圖由作者製作)

電流變化與歐姆定律驗證

根據歐姆定律（Ohm's Law），於同一穩定電阻負載之電路系統中，電流 I 與電壓 V 成正比，即： $I = V / R$ 為驗證本實驗系統之電性量測符合歐姆定律，除電壓量測外，亦同步觀察電流之變化趨勢。其結果繪製如圖 15 所示。經分析比較，圖 15 中各構型之電流變化曲線，其斜率變化與圖 14 中所示電壓變化曲線斜率呈高度一致性，顯示本測試系統具良好電性穩定性，且量測結果具高度精準度，充分符合歐姆定律之理論預期。

此外，延續對各構型之效能分析，實驗結果亦顯示，發電軸雙轉子進行相對運動（SRM）之相對轉速越大者，其輸出電流對轉速變化之敏感度越高，亦即其電流-轉速變化曲線斜率越大，與 CG 構型差距明顯。如圖 15 所示，11SG、22SG 與 33SG 構型之電流曲線斜率皆明顯大於 CG，進一步印證在相同動力輸入條件下，具備 SRM 特性的發電機構型可提供更高之發電效能。

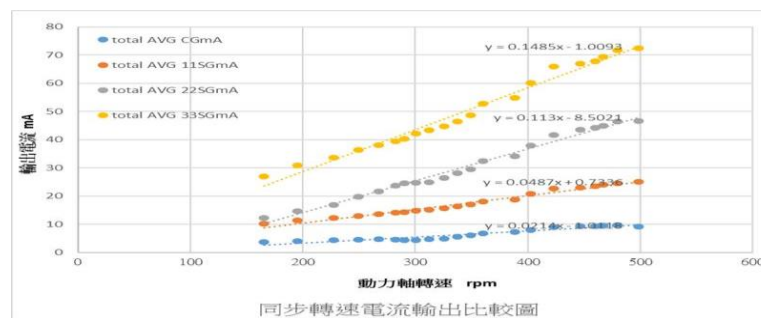


圖 15 CG、11SG、22SG、33SG 轉速同步電流輸出分布圖(本圖由作者製作)

捌、討論

一、SG 發電功率提升之探討

(一) 發電效能之提升

根據實驗結果顯示，SG 系統相較於傳統 CG 系統，其平均發電量提升約 25.17 倍，而 DSG 系統更達到平均提升 48.13 倍。從 CG、SG 與 DSG 結構之比較並結合法拉第電磁感應定律進行分析可得，SRM 機構在電磁感應強度上顯著優於傳統發電機，從而有效提升整體發電效能。

(二) 雙增速齒輪系統的作用

在傳統發電系統中，動力軸與轉子直接相連，當動力軸旋轉 2π （即一圈 360° ）時，轉子亦僅旋轉 2π ，轉速無法額外提升，其能量來源主要依賴於流體動能。

相較之下，一般風力發電機常透過加裝單組增速齒輪（齒比約為 2:1 至 3:1），實現轉速的倍增。例如，當動力軸旋轉 2π 時，轉子可達到 4π 至 6π 的旋轉角度，相當於提升 2 至 3 倍的轉速。

本研究所研發的 SG 系統則進一步採用雙增速齒輪組設計：其中，內轉子齒比為 3:1，外轉子齒比為 2:1。當動力軸轉動 2π 時，內轉子可達 6π （相當於三圈， 1080° ），而外轉子則達 4π （兩圈， 720° ）。透過內外轉子相對轉動所產生的加乘效應，最終可達成 5 倍的增速效能（3 倍外轉子 + 2 倍內轉子）。此創新齒輪組設計是 SG 系統發電效能顯著提升的關鍵因素之一。

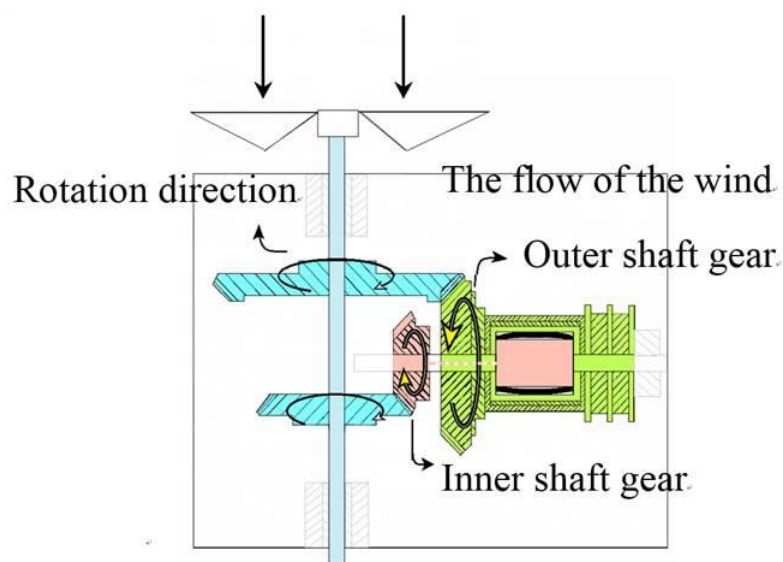


圖 16 Stanley's Rotation 雙齒輪組 示意圖(本圖由作者製作)

(三) 相對角速度之提升

在傳統發電機結構中，定子保持靜止，僅有轉子進行旋轉，因此磁場變化所對應之角速度為 $\omega = \omega - 0 = \omega$ (圖 17 左)，即僅由轉子單方面的角速度產生感應效應。

然而，在 SG 系統中，採用了內轉子與外轉子進行同步反向旋轉。此機構設計使得兩者之間的相對角速度顯著增加，其磁場變化對應的角速度為： $\omega = \omega - (-\omega) = 2\omega$ (圖 17 右)，也就是說，透過雙向旋轉所產生的相對運動，可使磁場變化速率提升至原本的兩倍，進一步增強電磁感應效果。如圖 17，此設計對於提升發電效率具有關鍵性貢獻。

角速度變化量

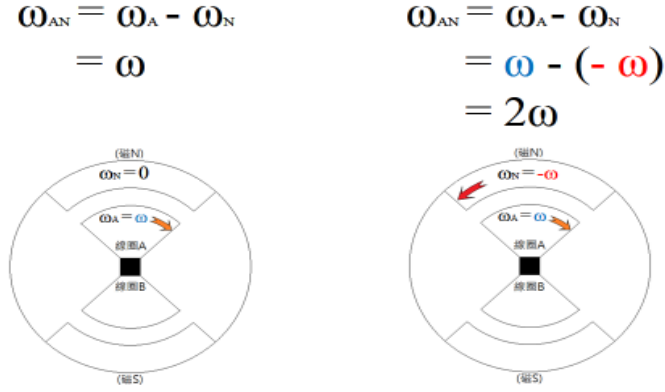


圖 17 角速度變化量(本圖由作者製作)

根據法拉第電磁感應定律

$$\begin{aligned} \varepsilon &= N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin\theta \rightarrow \varepsilon' = N \cdot B \cdot A \cdot 2\omega \cdot \sin\theta \\ &= 2 \cdot N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin\theta \\ &= 2 \cdot \varepsilon \end{aligned}$$

由於 SG 系統的相對角速度為 2ω ，為一般傳統單轉子發電機角速度 ω 的兩倍，因此可預測其感應電動勢 ε ，亦將提升至原來的兩倍，即產生 2ε 的效果。換言之，若將傳統單轉子發電機的轉子轉速提升至 2ω ，理論上其產生的電壓將與 SG 系統等同。此關係如圖 18 所示，驗證了 SG 系統透過提升相對角速度來增強發電效能的設計理念。

角速度變化量

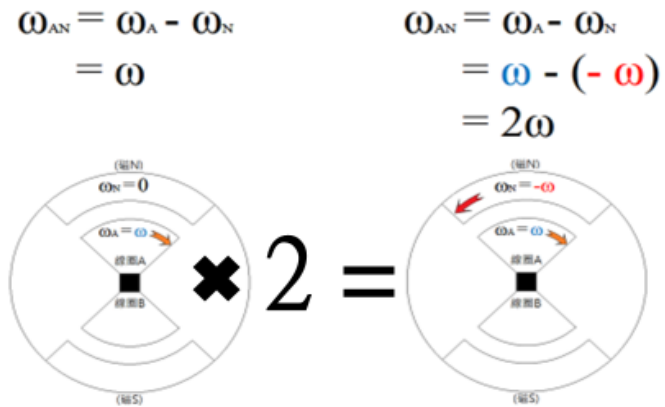


圖 18 SRM 電動勢預測 示意圖(本圖由作者製作)

二、討論二：實驗值與預測值差異探討

(一)、發現差異

為探討 SG 系統相較於傳統 CG 發電機在發電效能上的差異，本討論聚焦 SRM 結構中內外轉子之相對轉速對感應電動勢的影響，進行深入分析與比較。

根據法拉第電磁感應定律 (Faraday's Law, FdL)： $\varepsilon = N \cdot B \cdot A \cdot \sin\theta \cdot \omega$

在線圈匝數 N 、磁場強度 B 、線圈面積 A 及夾角 θ 為定值的前提下，感應電動勢 ε 與角速度 ω 成正比。實驗結果亦證實，在單一組實驗中，輸出電壓確實隨角速度成線性變化。

本研究設計了不同相對角速度的比較實驗，當動力軸轉速為 ω_0 時，對應各結構的

相對角速度如下：傳統 CG： $\omega_{CG} = \omega_0$ ，11SG 結構： $\omega_{11} = 2 \omega_0$ ，

22SG 結構： $\omega_{22} = 4 \omega_0$ ，33SG 結構： $\omega_{33} = 6 \omega_0$ ，

各組測得的輸出電壓皆呈線性增長，與相對角速度成正比，完全符合 FdL 所預測的物理現象。此結果如圖 19 所示，進一步驗證了雙轉子系統在提高發電效率方面的潛力與可行性。

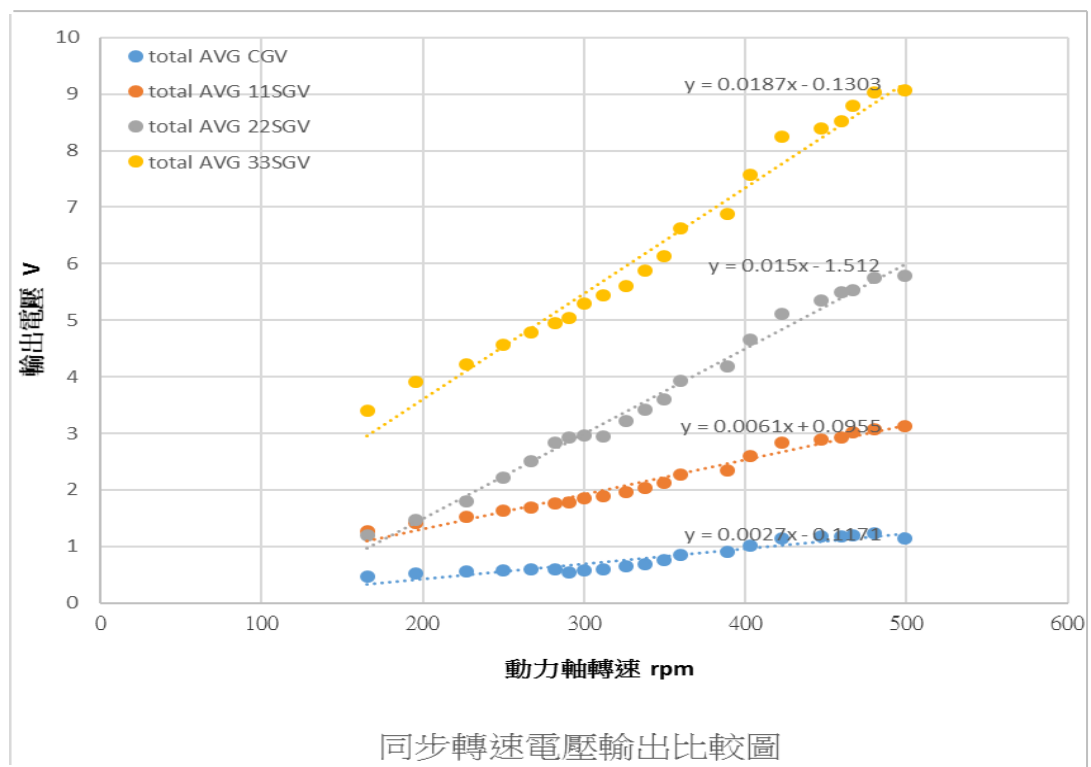


圖 19 CG、SG 同步轉速電壓輸出比較圖(本圖由作者製作)

本研究比較了 11SG 與傳統 CG 發電機在相同動力軸轉速輸入條件下之性能。由於 11SG 系統的相對角速度為 CG 的兩倍，依據法拉第電磁感應定律，預期其感應電動勢亦應為 CG 的兩倍。

然而，實驗結果顯示，11SG 實際產生之感應電動勢為 CG 的 2.78 倍（參見圖 20 及圖 21），明顯超出理論預測的兩倍值。換言之，11SG 電動勢不僅達到預期水平，且超出預測值約 1.39 倍（如圖 23 所示），顯示該系統在結構設計與能量轉換效率上具有顯著的增益效應。

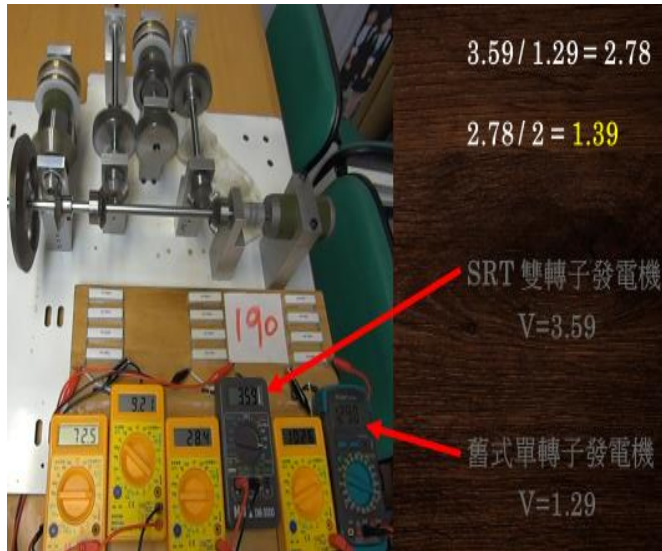


圖 20 11SG 對 CG 同步轉速電壓比較實驗(本圖由作者製作)

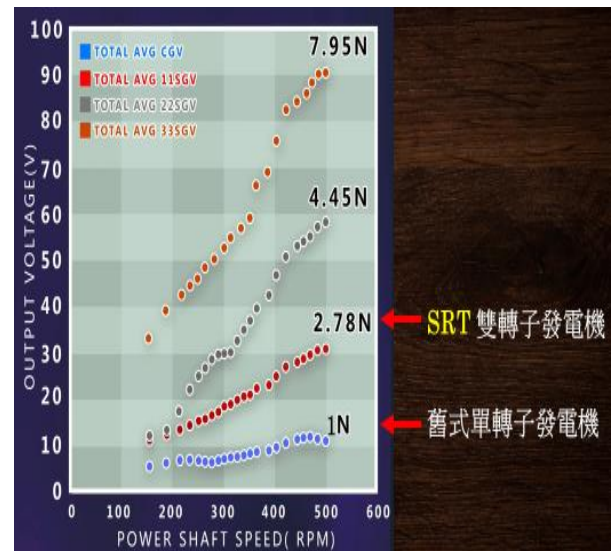


圖 21 11SG 對 CG 同步轉速電壓關係圖(本圖由作者製作)

實驗結果顯示，當傳統 CG 系統轉速提升至 400 rpm，為 SG 系統 200 rpm 轉速的兩倍時，根據理論推論應產生較高的感應電動勢。然而，實際測量數據指出，儘管 SG 系統的轉速僅為 CG 系統的一半，其感應電動勢仍顯著高於 CG 系統（如圖 22 所示）。

該現象進一步驗證了 SG 系統中雙轉子相對轉動機制對發電效能提升的關鍵作用。

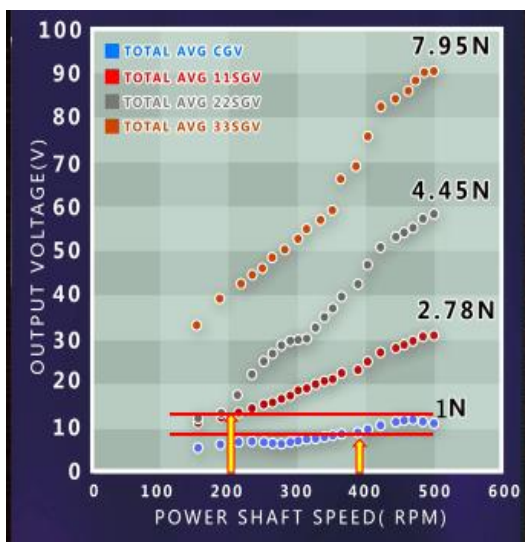


圖 22 11SG 對比 CG 2 倍轉速電壓比較圖(本圖由作者製作)

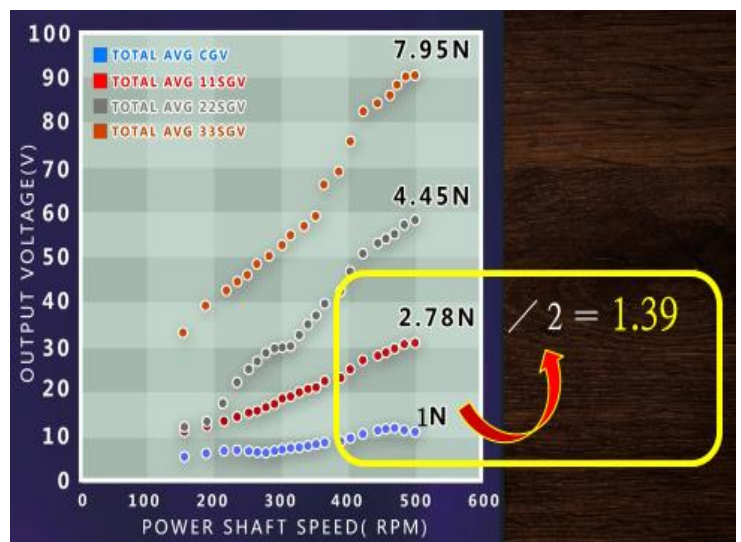


圖 23 CG 2 倍轉速對比 11SG 電壓比較圖(本圖由作者製作)

此外，電流測量結果顯示，11SG 系統所產生之電流為傳統 CG 系統的 1.38 倍，與其電壓提升幅度相當。

透過電壓與電流關係圖之分析，結果明確呈現兩者之間的線性關係，符合歐姆定律 $V = I * R$ （如圖 24 及圖 25 所示）。該結果進一步證實，11SG 系統在顯著提升發電效能的同時，仍遵循基本電學原理。

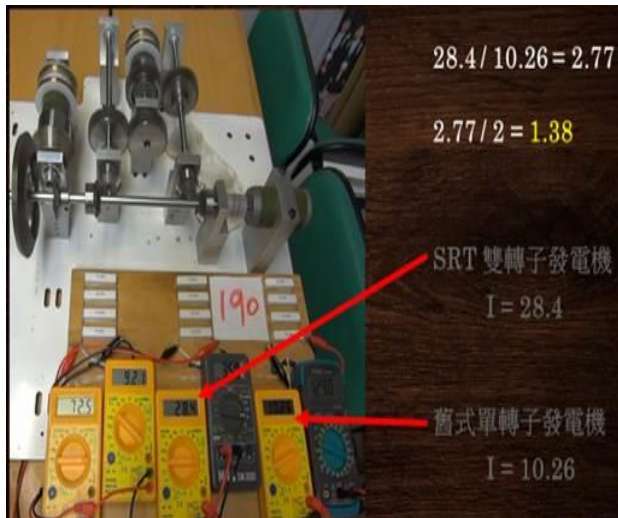


圖 24 11SG 對 CG 同步轉速電流比較實驗 (本圖由作者製作)

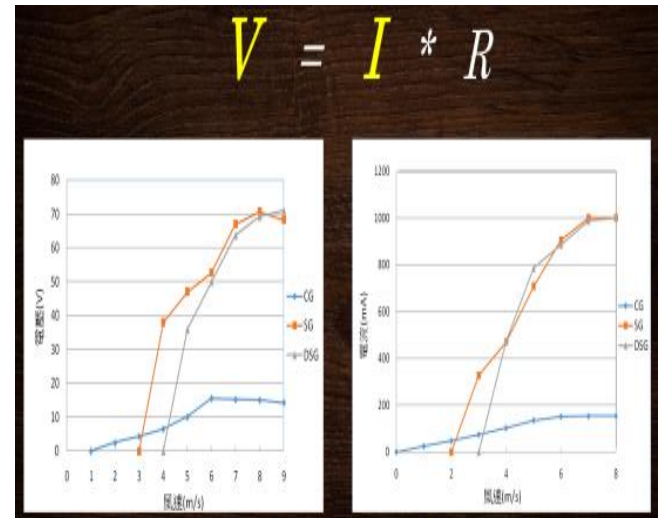


圖 25 DSG、SG、CG 電壓電流關係圖(本圖由作者製作)

根據本次實驗所得電壓與電流數據計算之電功率，結果為 $P = I * V = 1.38 \times 1.39 = 1.92$ ，即為傳統單轉子發電機輸出功率的 1.92 倍。該結果與先前第一代 SG 風洞實驗所得之 1.96 倍功率提升高度一致，進一步驗證了實驗數據之穩定性與可靠性(如圖 26 所示)。

由此可見，SRM 結構中雙轉子反向相對運動機制，在相同驅動轉速條件下，能夠產生超過傳統單轉子系統兩倍以上的感應電動勢及發電效率。基於此現象，我們將其命名為「史坦利效應 (Stanley Effect)」，表示 SG 結構中雙轉子組合 $n + n$ 的發電量超越傳統單轉子系統於 $2n$ 轉速下之發電性能(如圖 27 所示)。

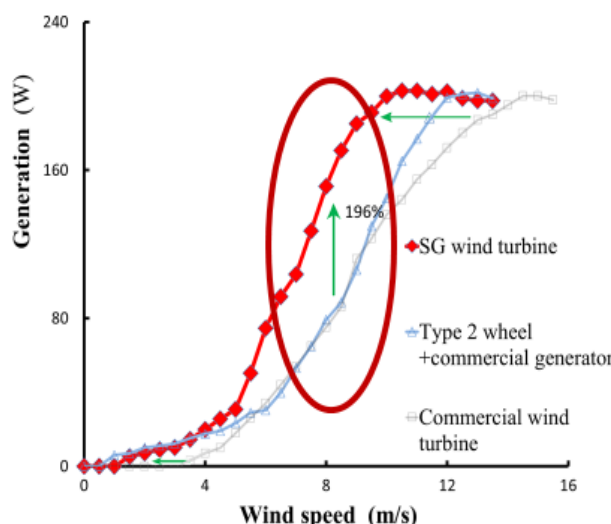


圖 26 SG vs CG 大型風洞實驗電功率比較關係圖(本圖由作者製作)

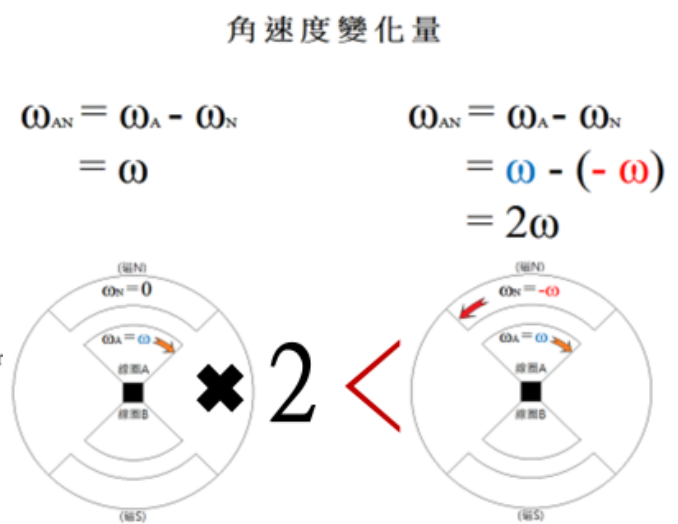


圖 27 SRM 對比 CG 電動勢 示意圖(本圖由作者製作)

(二)、數據分析與實驗檢討

根據法拉第電磁感應定律 (FdL)，在其他參數保持不變的條件下，11SG、22SG 與 33SG 系統的理論輸出電壓應與其相對角速度倍率成正比，分別為傳統 CG 輸出電壓的 2 倍、4 倍與 6 倍。因此，預期各組電壓—時間曲線的斜率應相等，呈現平行趨勢。

然而，實驗結果顯示，各系統的輸出電壓斜率均明顯高於 FdL 理論預測，違背了理論上的線性比例關係。具體數據分析如下：

- 11SG 與 CG 輸出電壓比值平均為 2.78，超出理論預期 2 倍的 1.39 倍；
- 22SG 與 CG 輸出電壓比值平均為 4.45，超出理論預期 4 倍的 1.112 倍；
- 33SG 與 CG 輸出電壓比值平均為 7.95，超出理論預期 6 倍的 1.325 倍。

此現象表明，在發電線圈轉子與磁場轉子間發生反向相對運動 (SRM) 時，感應電動勢的增幅遠超過單一轉子運動所能產生的電壓提升，通常達到 1.1 至 1.4 倍，甚至更高（如圖 28 所示）。綜合上述，SG 系統在相同驅動轉速下相較於 CG 系統呈現顯著提升的發電效率，且發電性能遠超過傳統單轉子發電機，提升倍率範圍介於 2.78 至 7.95 倍之間。

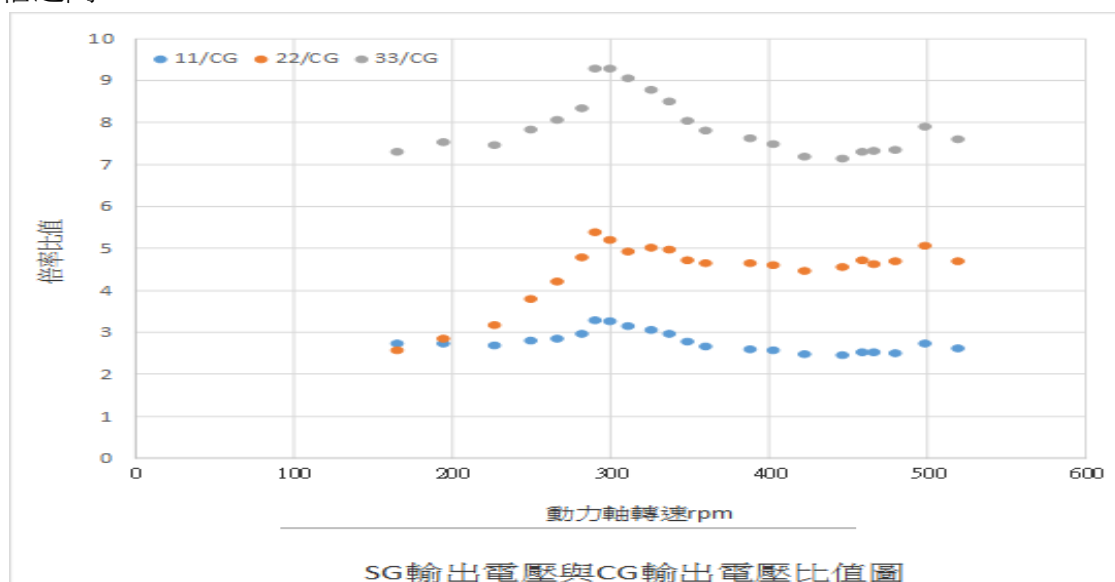


圖 28 SG 輸出電壓與 CG 輸出電壓比值圖(本圖由作者製作)

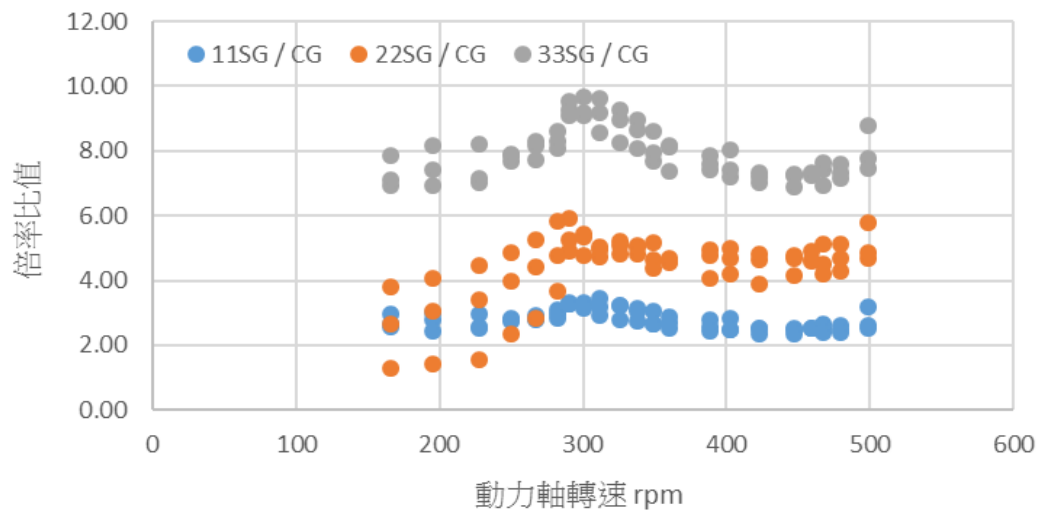
本研究中觀察到的實驗結果與法拉第電磁感應定律 (FdL) 預測存在顯著差異，初期對此現象感到相當困惑。為求驗證，我們對實驗設備進行全面檢查，確保 CG、11SG、22SG 及 33SG 各機構運作正常且轉動同步無誤。並於潤滑系統強化後，重複執行三輪實驗，結果仍與先前一致，無明顯變化。

截至目前，我們已累積數千筆實驗數據，皆反覆呈現相同趨勢。此情況促使我們重新思考：傳統 FdL 的推導及應用多基於「單轉子運動」的假設，而本研究所採用的 SRM 機構中，線圈與磁場產生特殊的相對反向運動，在此條件下，是否存在一套不同於傳統 FdL 的數學模型？換言之，所觀察到的電壓顯著增幅是否反映一種新的物理現象？

該問題成為後續研究的重點方向，亦為經典電磁理論於多轉子系統中的拓展提供了新的探索契機。

(三)、史坦利效應數學模型建立

為進一步驗證史坦利效應之穩定性與其表現規律性，本研究將於同一實驗中所蒐集之所有原始數據繪製成分布圖（參見圖 29）。結果顯示，各組數據在圖中呈現出高度密集且趨近平行之分布特徵，進一步支持該效應具一致性與可重複性之特性。



SG輸出電壓與CG輸出電壓比值圖

圖 29 SG 輸出電壓與 CG 輸出電壓比值原始資料分布圖(本圖由作者製作)

根據分布趨勢分析結果顯示，在 11SG、22SG 與 33SG 等不同結構配置下，其輸出電壓與 CG 發電機輸出電壓之比值皆呈現穩定趨勢，並各自對應特定且固定的倍數關係（如圖 30 所示）。

此一比值特性不僅具備穩定性與可預測性，亦對於史坦利效應（Stanley Effect）之數學模型建構具有關鍵意義。該結果進一步驗證此效應於不同結構條件下，展現出高度一致性與可重複性之行為特徵。

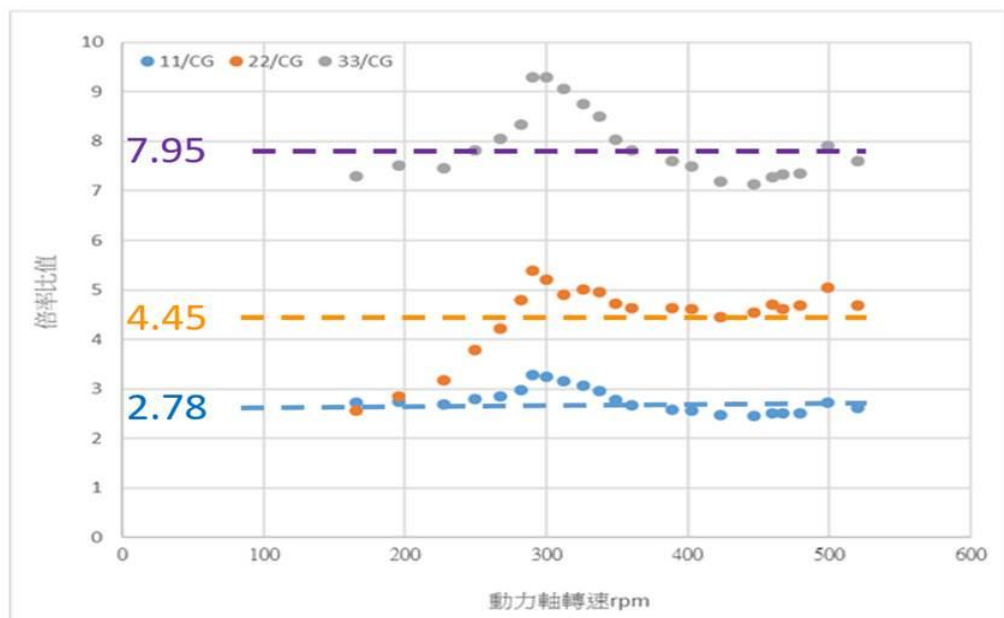


圖 30 SG 輸出電壓與 CG 輸出電壓比值圖(本圖由作者製作)

為確保實驗數據之可靠性與再現性，本研究進行多次重複實驗，並同步使用示波器記錄各發電系統之輸出波形（如圖 31 所示）。將本次獲得之波形資料與先前實驗結果進行比較與分析，兩者間展現高度一致性，進一步驗證了實驗數據穩定性與準確性。

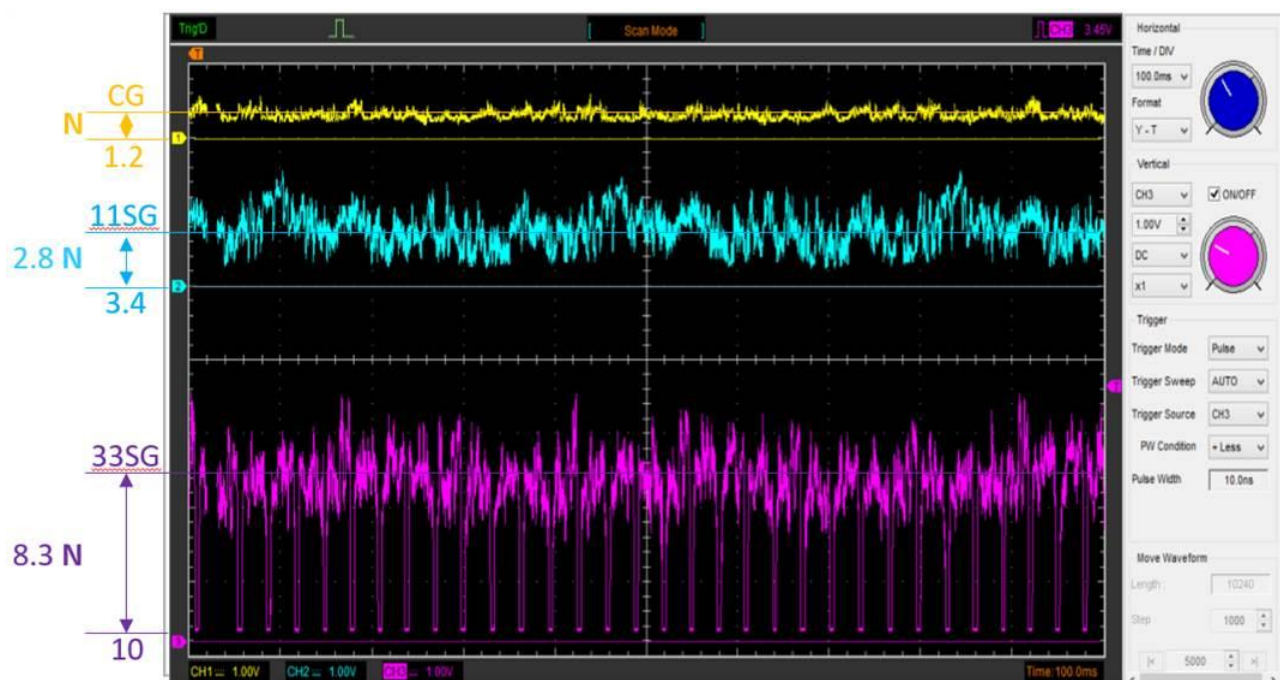


圖 31 CG、11SG、33SG 輸出電壓示波器波形圖(本圖由指導教師拍攝)

根據韋伯-費希納定律（Weber-Fechner Law），人類的感知與實際物理量之間的關係通常呈對數比例。例如，以對數定義的單位廣泛應用於各種自然現象：分貝（dB）衡量聲音響度、pH 值表示酸鹼強度、里氏震級量化地震強度，以及視星等級描述恆星亮度等。此外，根據本福特定律（Benford's Law），自然界中大量資料的數值分布也往往符合對數分布特性。

受到上述對數原理的啟發，我們進一步針對 11SG、22SG、33SG 與 CG 系統之間的電壓比值（即 11SG/CG、22SG/CG、33SG/CG）進行對數轉換分析。分別以常用對數（以 10 為底）與二進位對數（以 2 為底）處理數據，並利用電腦進行曲線擬合。

令人意外的是，經分析後的結果呈現出**固定斜率的線性函數關係**，顯示電壓增益比值與對數尺度間存在明確的數學模式（如圖 32 與圖 33 所示）。此發現為「史坦利效應」建立更具理論基礎的數學模型提供了有力依據。

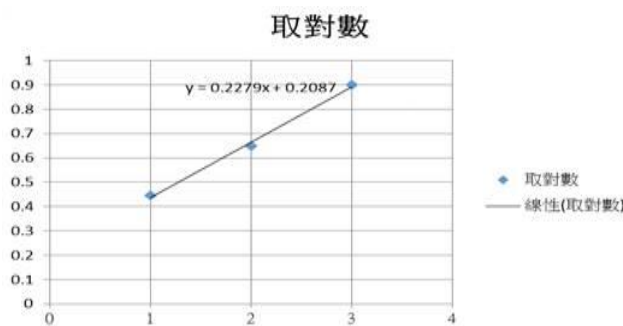


圖 32 SG 與 CG 輸出電壓比值原始資料常用對數圖

(本圖由作者製作)

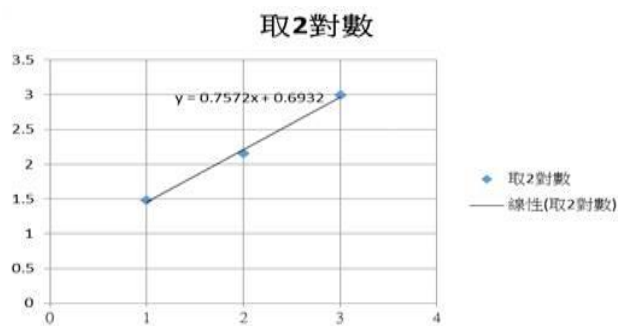


圖 33 SG 與 CG 輸出電壓比值原始資料 2 對數圖

(本圖由作者製作)

將 SG 電壓與 CG 電壓比值(圖 30) 進行更深入的拆解式數值分析，我們意外發現

1. 當 **11**SG 的輸出電壓與 CG 的輸出電壓比值平均約為 2.78 時，

可轉換為 $2^{(6/4)}$ 倍 → 可視為 $2^{(3/4)} * (2)$ → 更可進一步轉換為 $2^{(3/4)} * (1+1)$

2. 當 **22**SG 的輸出電壓與 CG 的輸出電壓比值平均約為 4.45 時，

可轉換為 $2^{(9/4)}$ 倍 → 可視為 $2^{(3/4)} * (3)$ → 更可進一步轉換為 $2^{(3/4)} * (1+2)$

3. 當 **33**SG 的輸出電壓與 CG 的輸出電壓比值平均約為 7.95 時，

可轉換為 $2^{(12/4)}$ → 可視為 $2^{(3/4)} * (4)$ → 更可進一步轉換為 $2^{(3/4)} * (1+3)$

上述數值分析結果顯示，以 2 為底數，以內外轉子相對轉速 ω 倍數為 n 作為指數，且指數呈現等差數列形式，係數為 $3/4$ 的數學關係。這一意外發現令我們振奮不已。

雙轉子系統（SRM）的發電效能會隨著內外轉子相對轉速的提升，呈現以 2 為底、指數為 $2^{[(3/4)(n+1)]}$ 倍數的增長，遠超過簡單的正反轉速相加效果。換言之，SRM 讓雙轉子發電機的角速度達到傳統單轉子發電機的 2ω 的 $2N$ 倍，卻產生了 $2^{[(3/4)(n+1)]}$ 倍的電動勢提升。

基於數學分析結果，我們提出「史坦利效應（Stanley Effect）」數學模型：

在 SRM 雙轉子系統中，當內外轉子相對角速度為 $2n\omega$ 時，所產生的電動勢為傳統單轉子系統角速度 $n\omega$ 的 $2^{[(3/4) * (n+1)]}$ 倍。

綜合來看，SRM 雙轉子系統使得 (SG 的 $n+n$) > (CG 的 $2n$)，一加一大於二的效應，即加法效果大於單純加總的乘法效果，證實了史坦利效應提升發電效率，並且該電動勢公式完美對應我們所發現的史坦利效應數學模型（STANLRY EFFECT Math Model）。

$$\varepsilon = N * B * A * \sin\theta * \omega * 2^{[(\frac{3}{4}) * (n+1)]}$$

ε : 電動勢 (電壓) N : 線圈匝數 B : 磁場強度 A : 線圈面積

θ : 線圈截面與磁場夾角 ω : 轉子轉動角速度 n : 轉子反向相對運動之倍數

三、討論三：力學討論

(一)、力學解釋一

儘管我們已從數學角度對現象進行了解釋，但仍希望進一步探究其背後的物理原理。

目前，我們提出的力學解釋如下：

以圖 34 與圖 35 為例，當僅有紅色內轉子單獨旋轉時，所需克服的感應磁吸力與紅色內轉子與綠色外轉子進行同步反向旋轉時所需克服的總磁吸力相當。換言之，單轉子與雙轉子反向旋轉在磁吸阻力上並無明顯差異，顯示該結構在能量轉換效率上具有物理對稱性，這有助於我們更深入理解 SG 系統的工作機制。

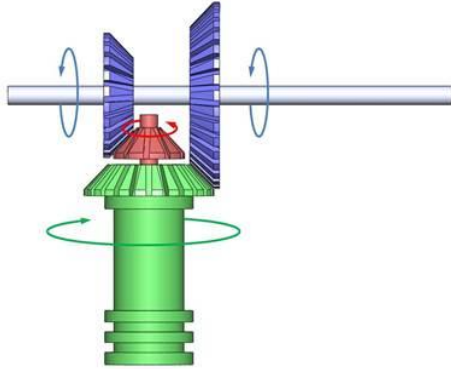


圖 34 SG 單齒輪組 示意圖(本圖由作者製作)

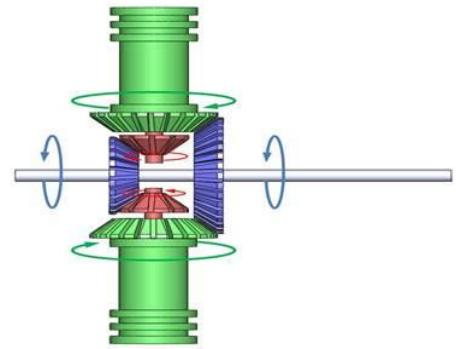


圖 35 DSG 雙齒輪組 示意圖(本圖由作者製作)

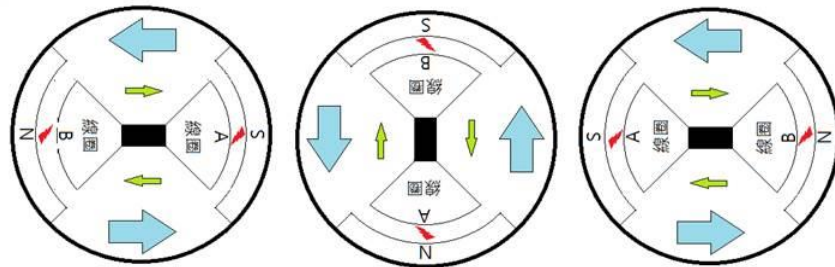


圖 36 雙齒輪反向相對運動產生電磁感應 示意圖(本圖由作者製作)

這一現象可從中學階段的基本力學實驗中得到初步理解，如圖 37 所示。在 SRM (Stanley's Rotation Mechanism) 運作時，兩個藍色動力輪皆須克服感應磁吸力。表面上看似需要額外施力，但若假設齒輪質量可忽略不計，則可發現：隨著齒輪傳動比的增加，系統所需的力矩亦隨之增加，進而產生省力效果。齒比越大，所需輸入力越小，機構越省力，而由此額外獲得的發電效益也就越明顯。

這一力學解釋與我們先前基於數學模型所做出的歸納結果相符。目前，我們正著手設計一套專門針對 SRM 機制的力學實驗，期望能進一步驗證上述假設與推論，確認 SRM 結構確實導致 SG 系統在物理機制上具有更高的發電效率。

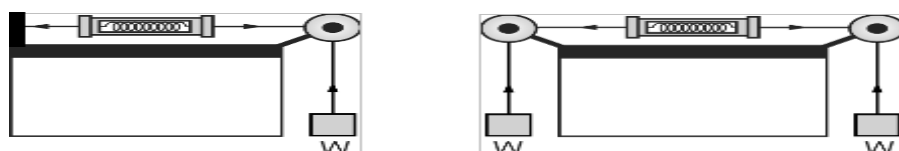


圖 37 單方施力平衡與雙方施力平衡力學示意圖(摘自南一版國中課本)

(二)、力學解釋二

我們認為內外轉子既然皆為旋轉運動，所以便想從轉動能的角度進行討論，轉動能(Rotational Kinetic Energy)為一個物體因其轉動而擁有的能量，公式

$$E_{k,rotation} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

其中 I 是轉動慣量， ω 是角速度。

轉動慣量公式為 $I = m * r^2$ ，

其中 m 是質量， r 是轉動半徑。

合併上兩式可得轉動能 $E_k = (1/2) * m * r^2 * \omega^2$ 。

今假設內、外轉子質量皆為 m ，內轉子轉動半徑為 r ，外轉子轉動半徑為 $1.1r$ ，內外轉子轉動角速度皆為 ω

1. 傳統單轉子轉動能計算分析：

傳統單轉子單向旋轉(圖 38)切割磁力線產生電動勢之轉動能經計算為

$$E_k = (1/2) * m * r^2 * \omega^2$$

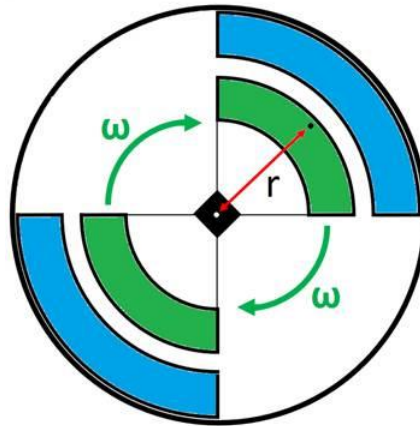


圖 38 單轉子單向轉動運動 示意圖(本圖由作者製作)

2. 11 雙 SG 轉子轉動能計算分析：

11SG 設置的雙轉子反向 1ω 運動(圖 39)切割磁力線產生電動勢之轉動能經計算為

$$\text{內轉子 } E_k = (1/2) * m * r^2 * \omega^2$$

$$\text{外轉子 } E_k = (1/2) * m * (1.1r)^2 * \omega^2$$

$$\text{總 } E_k = \text{內轉子 } E_k + \text{外轉子 } E_k$$

$$= (1/2) * m * r^2 * \omega^2 + (1/2) * m * (1.1r)^2 * \omega^2$$

$$= (1/2) * m * r^2 * \omega^2 + (1/2) * m * 1.21r^2 * \omega^2$$

$$= (0.5) * m * r^2 * \omega^2 + (0.6) * m * r^2 * \omega^2$$

$$= (1.1) * m * r^2 * \omega^2$$

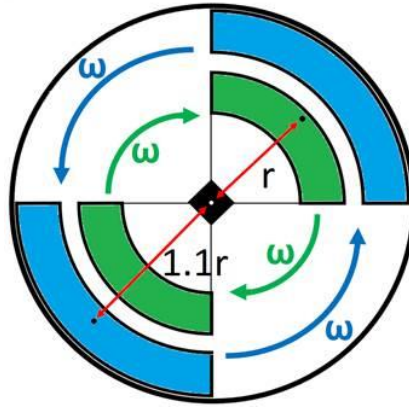


圖 39 11SG 雙轉子反向 1ω 轉動運動 示意圖(本圖由作者製作)

我們把雙轉子反向相對運動的轉動能除以傳統單轉子運動的轉動能的比值，得到能量比 = $(2.2) * (1/2) * m * r^2 * \omega^2$

另電能正比於電動勢(電壓)平方，反之，電動勢(電壓)正比於能量開根號

$$E = P * t = V^2 / R * t$$

所以，我們把雙轉子反向相對運動的轉動能除以傳統單轉子運動的轉動能的比值，得到能量比，再開根號，得到電動勢比 $\sqrt{2.2} = 1.48$

3. 22SG 雙轉子轉動能計算分析：

22SG 設置的雙轉子反向 2ω 運動(圖 40)切割磁力線產生電動勢之轉動能經計算為

$$\text{內轉子 } E_k = (1/2) * m * r^2 * (2\omega)^2$$

$$\text{外轉子 } E_k = (1/2) * m * (1.1r)^2 * (2\omega)^2$$

$$\text{總 } E_k = \text{內轉子 } E_k + \text{外轉子 } E_k$$

$$= (1/2) * m * r^2 * (2\omega)^2 + (1/2) * m * (1.1r)^2 * (2\omega)^2$$

$$= (1/2) * m * r^2 * 4\omega^2 + (1/2) * m * 1.21r^2 * 4\omega^2$$

$$= (2.0) * m * r^2 * \omega^2 + (2.4) * m * r^2 * \omega^2$$

$$= (4.4) * m * r^2 * \omega^2$$

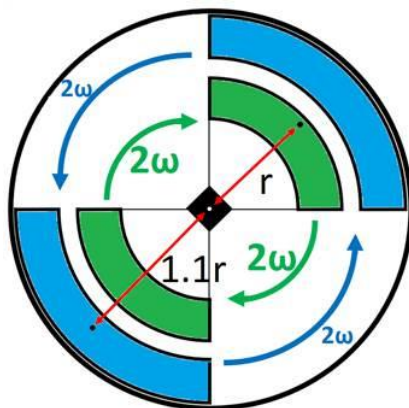


圖 40 22SG 雙轉子反向 2ω 轉動運動 示意圖(本圖由作者製作)

我們把雙轉子反向相對運動的轉動能除以傳統單轉子運動的轉動能的比值，得到能量比 $= (8.8) * (1/2) * m * r^2 * \omega^2$

另電能正比於電動勢(電壓)平方，反之電動勢(電壓)正比於能量開根號

$$E = P * t = V^2 / R * t$$

所以，我們把雙轉子反向相對運動的轉動能除以傳統單轉子運動的轉動能的比值，得到能量比，再開根號，得到電動勢比 $\sqrt{8.8} = 2.96$

4. 33SG 雙轉子轉動能計算分析：

33SG 設置的雙轉子反向 3ω 運動(圖 41)切割磁力線產生電動勢之轉動能經計算為

$$\text{內轉子 } E_k = (1/2) * m * r^2 * (3\omega)^2$$

$$\text{外轉子 } E_k = (1/2) * m * (1.1r)^2 * (3\omega)^2$$

$$\text{總 } E_k = \text{內轉子 } E_k + \text{外轉子 } E_k$$

$$= (1/2) * m * r^2 * (3\omega)^2 + (1/2) * m * (1.1r)^2 * (3\omega)^2$$

$$= (1/2) * m * r^2 * 9\omega^2 + (1/2) * m * 1.21r^2 * 9\omega^2$$

$$= (4.5) * m * r^2 * \omega^2 + (5.4) * m * r^2 * \omega^2$$

$$= (9.9) * m * r^2 * \omega^2$$

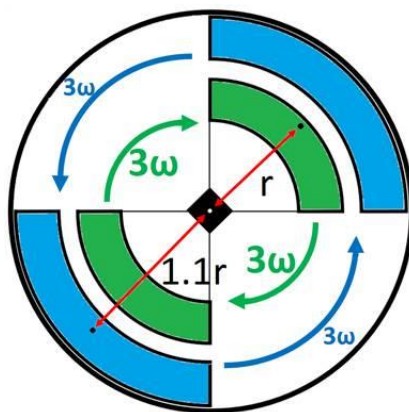


圖 41 33SG 雙轉子反向 3ω 轉動運動 示意圖(本圖由作者製作)

我們把雙轉子反向相對運動的轉動能除以傳統單轉子運動的轉動能的比值，得到能量比 $= (19.8) * (1/2) * m * r^2 * \omega^2$

另電能正比於電動勢(電壓)平方，反之電動勢(電壓)正比於能量開根號

$$E = P * t = V^2 / R * t$$

所以，我們把雙轉子反向相對運動的轉動能除以傳統單轉子運動的轉動能的比值，得到能量比，再開根號，得到電動勢比 $\sqrt{19.8} = 4.45$

四、討論四：實驗事項探討

（一）實驗條件控制

本研究之 SG 發電機設計原理係基於流體動能轉換，並選用風能作為主要能源。為排除天然風源的不穩定性對實驗數據造成干擾，實驗全程於穩定可控的室內風洞環境中進行，以確保各次試驗條件一致，提升結果可靠度。

（二）採樣次數與數據處理

為減少實驗誤差並提高數據精確性，每組實驗皆進行 12 次重複測試。資料處理方面，使用 Microsoft Excel 進行統計分析，並將數據依大小進行降冪排序。為排除極端值對結果的影響，剔除偏離平均值 2 個標準差以上的數據，再取平均值作為代表值，以增強數據的穩定性與信效度。

（三）測量信度控制

為確保測量結果具高度信度與準確性，實驗中使用 Agilent 34970A 多功能電壓電流量測儀進行數據擷取。該儀器具備優異的精度與穩定性，能有效降低儀器誤差對實驗結果的影響。

（四）實驗器材調整與優化

每次正式實驗前皆先進行預測試，以排除潛在設備問題。例如，機械軸心磨擦阻力過大導致起始轉速延遲，經更換氧化鋁陶瓷軸承並使用 WD-40 防鏽潤滑劑改善其運作順暢度。

增速齒輪原先以不鏽鋼製作，雖提升耐用性，卻同時造成重量增加與摩擦上升，導致起始風速需達 5 m/s 才能驅動，效果不理想。後續將齒輪磨薄並鑽孔減重，效果仍不佳。最終改用強化工程塑膠重新製作齒輪，並進行表面拋光與潤滑處理，成功降低摩擦力，改善啟動性能。

在發電機組裝過程中，亦發現輸出電流電線因出現褶皺，影響數據判讀準確性。為改善此問題，重新設計電線結構：將其置入環形塑膠管中，在凹槽內嵌貼銅片，並以彈性電刷進行電流收集與傳輸，確保穩定導電與準確輸出。

（五）紀錄方法的優化

傳統以人眼觀察並手動紀錄即時數據的方式，容易因反應時間或判讀錯誤導致資料遺漏與偏誤。

為克服此限制，本研究導入「影像同步數據擷取」技術，透過即時錄影紀錄整段實驗過程，後續再進行逐格畫面分析與數據擷取，不僅可完整保存每筆資料，也能大幅降低人為紀錄錯誤的可能性，提升整體資料蒐集的準確性與完整性。

玖、 雙轉子發電機模組化設計與應用

本研究提出之雙轉子發電機（SRM）系統，不僅於發電效能顯著優於傳統單轉子架構，亦具備高度模組化潛能，極具實用應用價值。其設計與應用構想可歸納如下：

1. 結構空間優化潛力

傳統單轉子發電機通常採用長條型橫向佈局，構形受限且佔用空間較大（如圖 42、圖 43 上半部所示）。此一限制使其於空間受限之應用場景中實施困難。

2. 模組化與並聯擴展能力

雙轉子發電機因具備對稱式結構設計，得以透過模組化方式進行彈性並聯配置，大幅減少所需機構零件與安裝空間（如圖 43 下半部、圖 44 所示）。此特性亦降低系統維護複雜度，提升工程整合效率。

3. 適用於空間受限之移動平台

基於結構緊湊與並聯彈性特性，雙轉子模組尤適用於狹窄或空間受限之移動載具，例如柴電潛艦、增程式電動車等高效能源回收應用場景（如圖 46、圖 47）。

4. 利於既有系統升級改造

本雙轉子發電模組亦可作為現有傳統發電廠機組之直接替換方案。其高效率、模組化與結構兼容性，便於與既有發電機殼體與驅動軸結合，無需大幅改裝即可提升整體發電效率（如圖 48、圖 49、圖 50 所示）。

綜合而言，雙轉子發電機具備高效能、空間節省與模組化擴展優勢，為新一代分散式能源系統與特殊用途能源設備提供具前瞻性之發展平台。



圖 42 一般市售單轉子柴油發電機組

(引自谷歌搜尋網站)

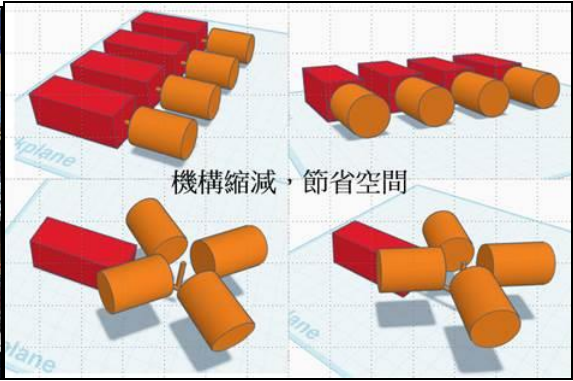


圖 43 發電機所占空間設計圖(上傳傳統單轉子、下雙轉子)

(本圖由作者製作)

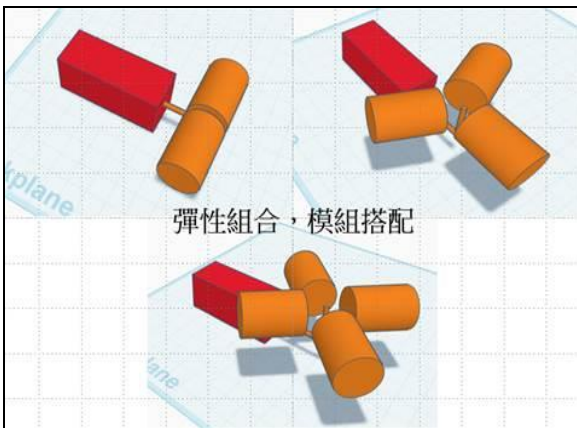


圖 44 雙轉子發電機模組化並聯 設計圖

(本圖由作者製作)

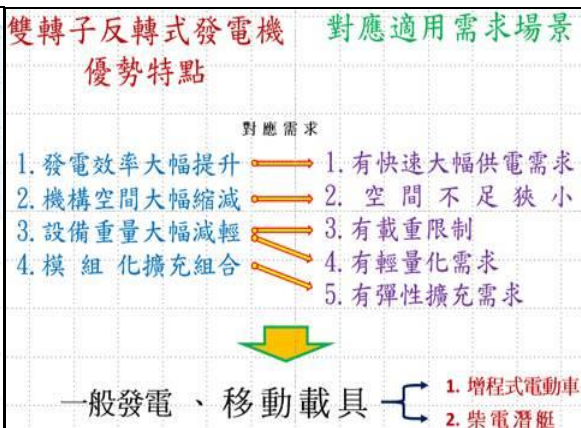


圖 45 雙轉子發電機優勢與對應場景配對圖

(本圖由作者製作)



圖 46 增程式電動車發電機機構配置圖

(引自谷歌搜尋網站)

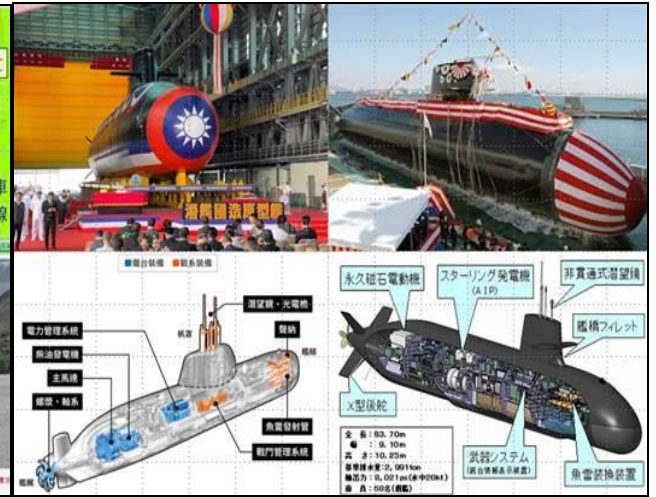


圖 47 柴油潛艦發電機機構配置圖

(引自谷歌搜尋網站)

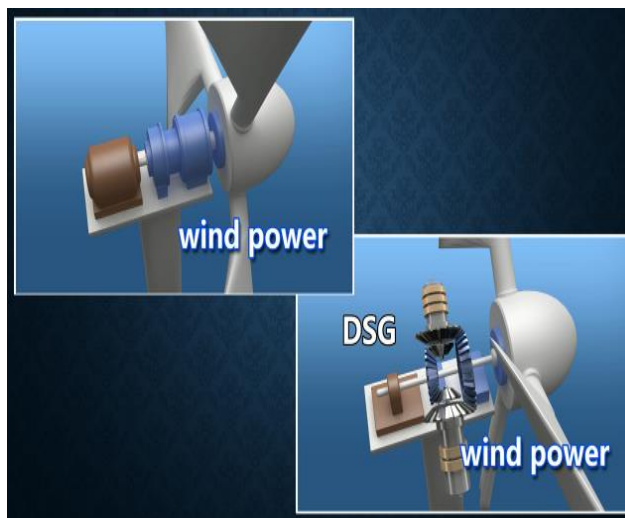


圖 48 DSG 模組替換風力 CG 設計圖(本圖由作者製作)

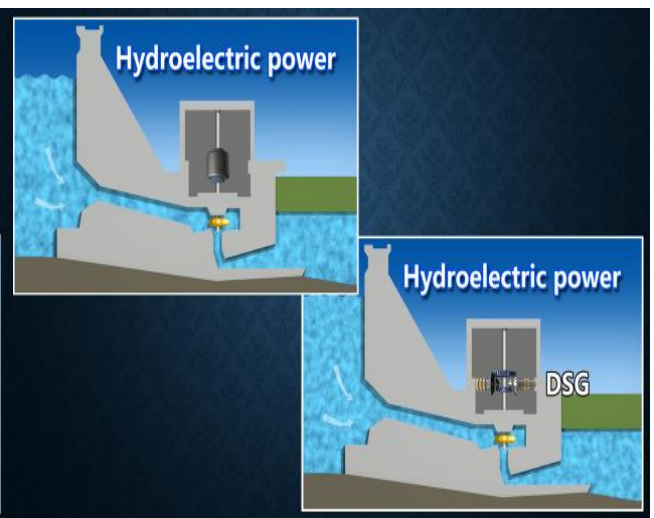


圖 49 DSG 模組替換水力 CG 設計圖(本圖由作者製作)

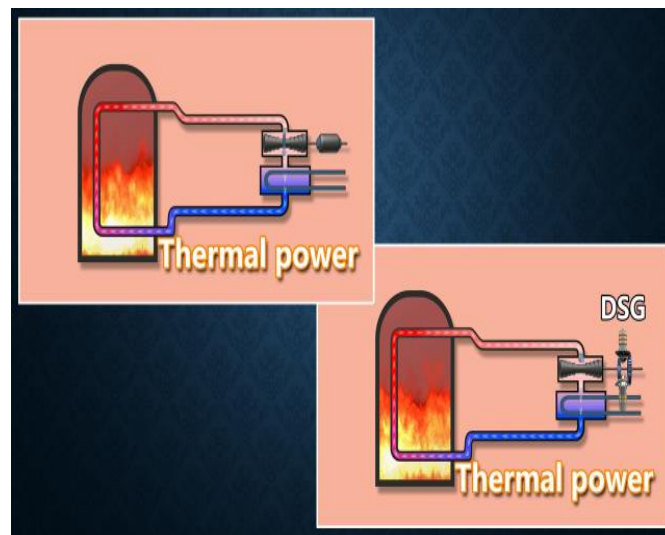


圖 50 DSG 模組替換火力 CG 設計圖(本圖由作者製作)

拾、結 論

- 一、傳統單轉子發電機在未配置齒輪增速裝置的情況下，其能源轉換效率僅為雙轉子發電機的約 13% 至 36%，顯示於低速驅動條件下之效能顯著受限。
- 二、所提出之 SG 雙轉子發電系統透過「Stanley's Rotation」結構導入內外轉子相對反向旋轉機制，能有效提升系統角速度，並藉由指數倍率模型 $2^{[(\frac{3}{4}) * (n+1)]}$ 強化電能產出，突破傳統單轉子發電機對電壓增幅之限制。
- 三、SG 模組具備高度模組化與擴充性，可依實際電力需求靈活轉換為高輸出版本之 DSG 模組，進一步擴展整體系統發電容量，提升應用彈性。
- 四、SRM 結構下的雙轉子發電機，其電動勢之產生行為，經實驗驗證可由本研究所建立之 Stanley Effect 數學模型準確描述：

$$\varepsilon = N * B * A * \sin\theta * \omega * 2^{[(\frac{3}{4}) * (n+1)]}$$

ε : 電動勢 (電壓) N : 線圈匝數 B : 磁場強度 A : 線圈面積

θ : 線圈截面與磁場夾角 ω : 轉子轉動角速度 n : 轉子反向相對運動之倍數

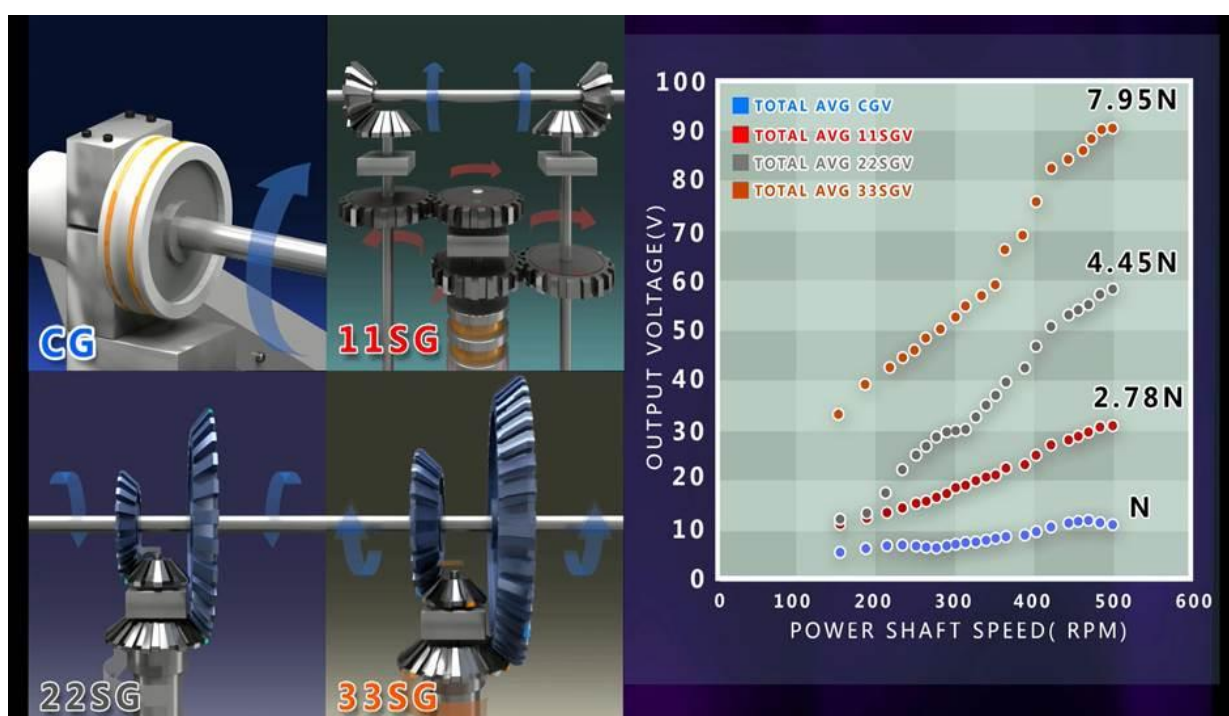


圖 51 史坦利效應不同角速度發電數據關係圖(本圖由作者製作)

拾壹、未來展望

本研究所提出之雙轉子發電機模組（SG）展現出顯著優於傳統單轉子系統之發電效率與結構彈性，未來可於多元能源領域中發揮應用潛力。後續研究方向與應用規劃如下：

1. 跨能源領域之模組化應用拓展

在評審教授指導下，將進一步開發適用於風力、水力與蒸汽動力來源的模組化雙轉子發電系統，藉由原型製作與實證測試，驗證不同能源輸入條件下的穩定性與轉換效率。

2. 實地導入綠能發電場域

規劃推廣本系統至風力發電、小型水力設施及混合式地熱發電等綠能應用場域，進行實地試營運與商轉驗證，達到高效率低損耗之綠能轉換，助益碳中和與永續發展目標。

3. 深化史坦利效應理論基礎研究

後續持續於評審教授指導下，針對「史坦利效應（Stanley Effect）」進行理論架構強化與數學模型驗證，建構完整之多轉子電磁感應模型體系，拓展經典電磁理論於非線性系統之適用性。

4. 雙轉子車用發電模組原型開發

目前已將傳統汽車單轉子發電機改裝為雙轉子架構，並同步試製樣機建構，期望於近期內完成具備商轉潛力之原型機，應用於增程型電動車與混合動力車輛（如圖 52—圖 55 所示）。

未來本研究將持續推進理論與應用整合，致力於打造高效能、模組化、可擴展之新世代發電技術體系，為全球能源轉型與分散式發電應用提供具體解決方案。



圖 52 1.3kw 傳統車用單轉子發電機外觀
(本圖由指導教師拍攝)



圖 53 1.3kw 傳統車用單轉子發電機磁芯(欲改裝為內轉子)
(本圖由指導教師拍攝)



圖 54 1.3kw 傳統車用單轉子發電機發電線圈(欲改裝為外轉子)
(本圖由指導教師拍攝)



圖 55 內、外轉子改組裝示意圖
(本圖由指導教師拍攝)

拾壹、參考文獻

陳國忠，(2005)，葉片旋轉角對水平是風力機性能影響之數直言就。台灣科技大學博士論文

郭俊賢，(2008)，小型風力充電系統之開發，大同大學碩士論文

張耀文，(2007)，教育用低風速小型風車之開發，大同大學博碩士論文

鵬芃科藝網站，www.pengky.cn

谷歌搜尋網站，www.google.com

【評語】 052317

1. 作品經由雙轉子反向旋轉結構，透過相對運動提升角速度與磁場變化，增強感應電動勢生成，提升發電機效能。研究主題清楚且聚焦，具有應用能源領域潛力。
2. 建議加強文獻探討，進一步說明雙轉子發電機的發展現況及優缺點，來說明研究之重要性。
3. 為進一步提升研究的論證，建議可嘗試以不同類型的線圈數量、磁場強度或負載變化進行控制變因實驗，增強研究更完整。

作品海報

雙轉子反向相對運動

對感應電動勢影響之研究

摘要

本研究針對傳統單轉子發電機效能不足能量耗損問題，提出創新雙轉子技術以提升發電效率降低能源浪費。核心設計為雙轉子反向旋轉結構，透過相對運動提升角速度與磁場變化量，增強感應電動勢生成。透過對比實驗，證實雙轉子結構較傳統單轉子提升1.4倍感應電動勢，參考Weber-Fechner Low建立對數數學模型，成功描述電動勢與旋轉參數之非線性關係。

$$\varepsilon = N * B * A * \sin\theta * \omega * 2^{[(\frac{3}{4}) * (n+1)]}$$

ε: 電動勢 N: 線圈匝數 B: 磁場強度 A: 線圈面積 θ: 線圈面與磁場夾角 ω: 轉動角速度 **n**: 轉子相對運動之倍數

同時研發雙轉子架構展現穩定性與模組化彈性擴充性，具備取代傳統發電機潛力，更適用於分散式發電與再生能源領域，展現高效、緊湊且具實用價值之創新應用之電力生成技術方案。

研究動機與目的

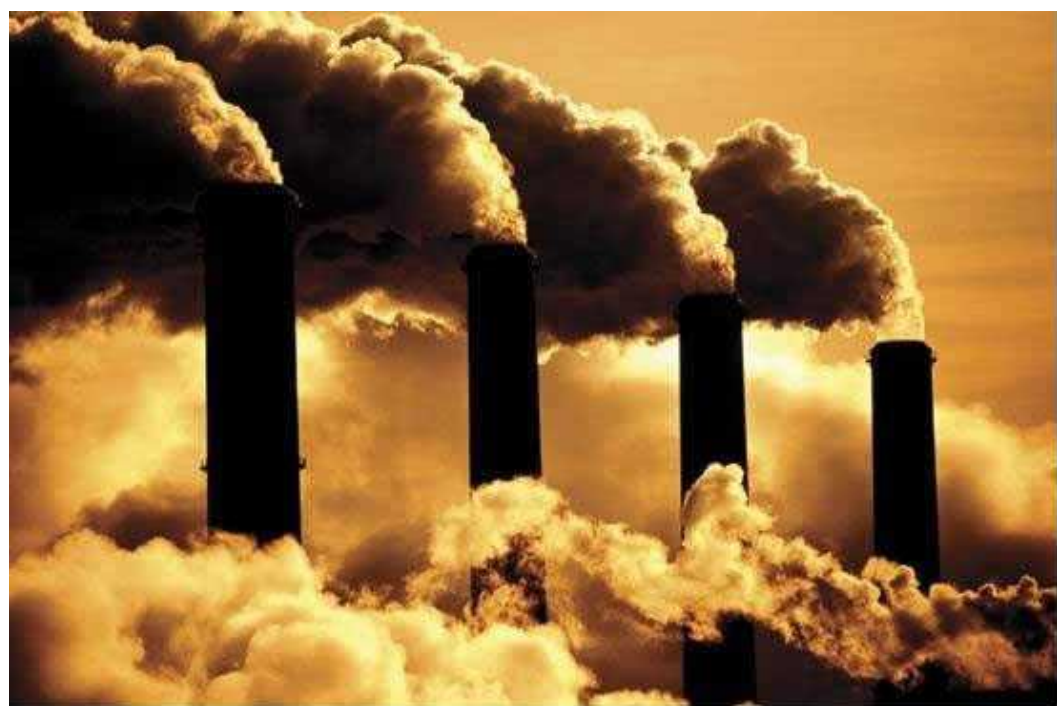


圖1、傳統發電排放大量溫室氣體 (引自谷歌搜尋網站)



圖2、溫室效應破壞北極熊棲地 (引自谷歌搜尋網站)

自工業革命以來，能源需求激增，化石燃料導致資源枯竭與環境惡化。電力成為現代社會運作核心，各類發電方式皆仰賴發電機之電磁感應原理。傳統單轉子發電機效能受限，雙轉子發電機結合史坦利效應，有望大幅提升發電效率並降低成本，促進永續能源發展。

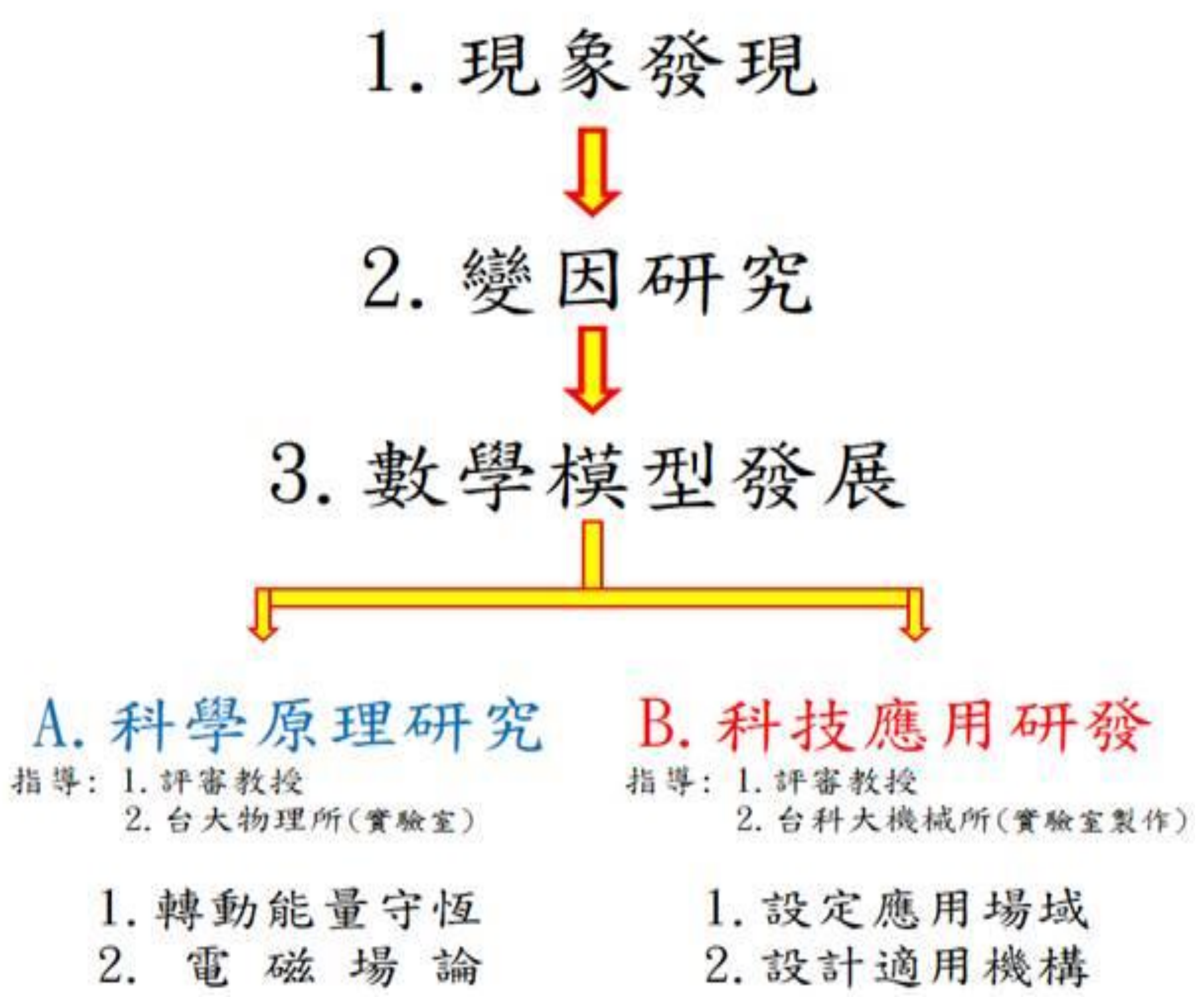
本次專題研究旨在針對史坦利效應的高效率新式發電機組，深入探究其提升發電效率的數學模型，研發模組化彈性適用機構，將發電機組建置任何流體動能發電裝置，故設定需完成下列目的：

- 一、設計多模式運轉系統模組。
- 二、製作出可信賴的測量治具。
- 三、測試雙轉子對發電效能影響狀況。
- 四、研究雙轉子發電機的數學模型。
- 五、研發雙轉子發電機組替換傳統單轉子發電機之適用性。

研究設備、器材與研究流程

表 1 研究設備及器材表 (作者及指導教師拍攝)

水泥電阻測量治具	齒輪	陶瓷培林	直流發電機
支架	Agilent34970A 電壓、電流計	大型環境風洞(央大)	阻流型葉扇
直流轉速控制器	直流 CG、SG 發電機	水泥電阻測量治具及量測電表組	MRL TH-041 直流電供應器
直流馬達 (模擬動力源)	CG 測試裝置	11SG 測試裝置	22、33 SG 測試裝置



研究結果

研究一、CG、SG、DSG 發電效能驗證 (等能輸入)

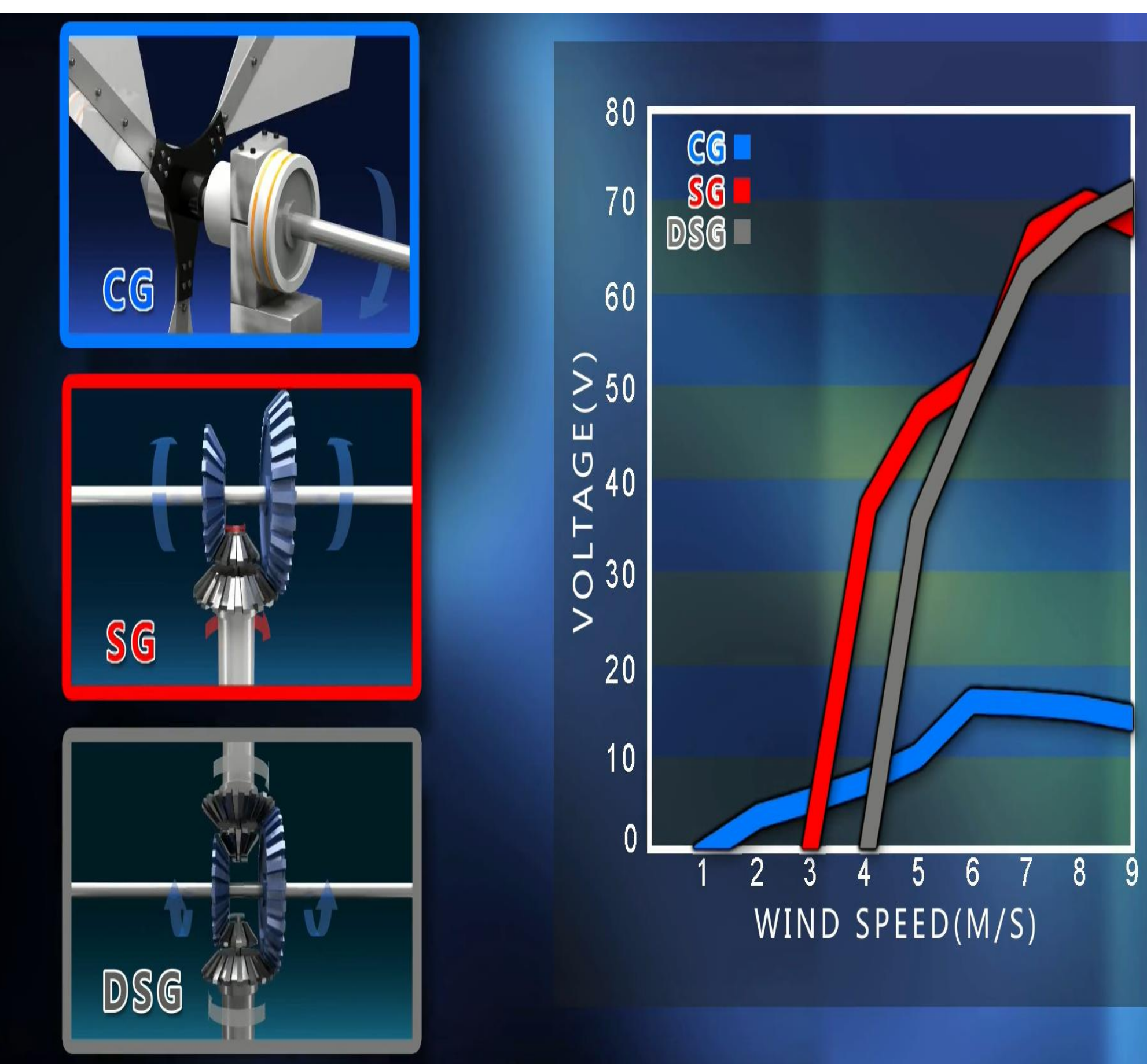


圖3、CG、SG、DSGCGSG發電電壓比較圖 (作者製作)

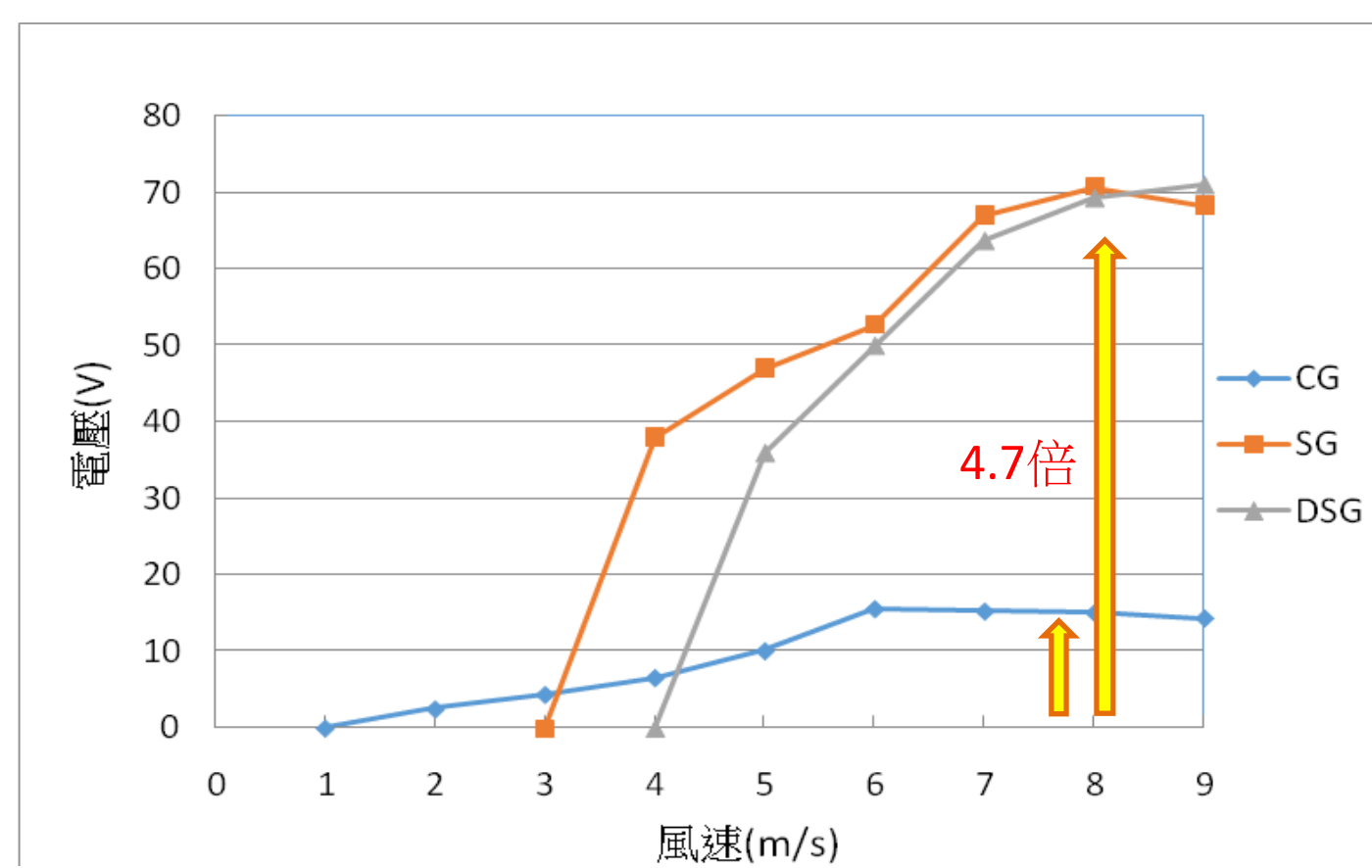


圖4、CG、SG、DSGCGSG發電電壓比較圖 (作者製作)

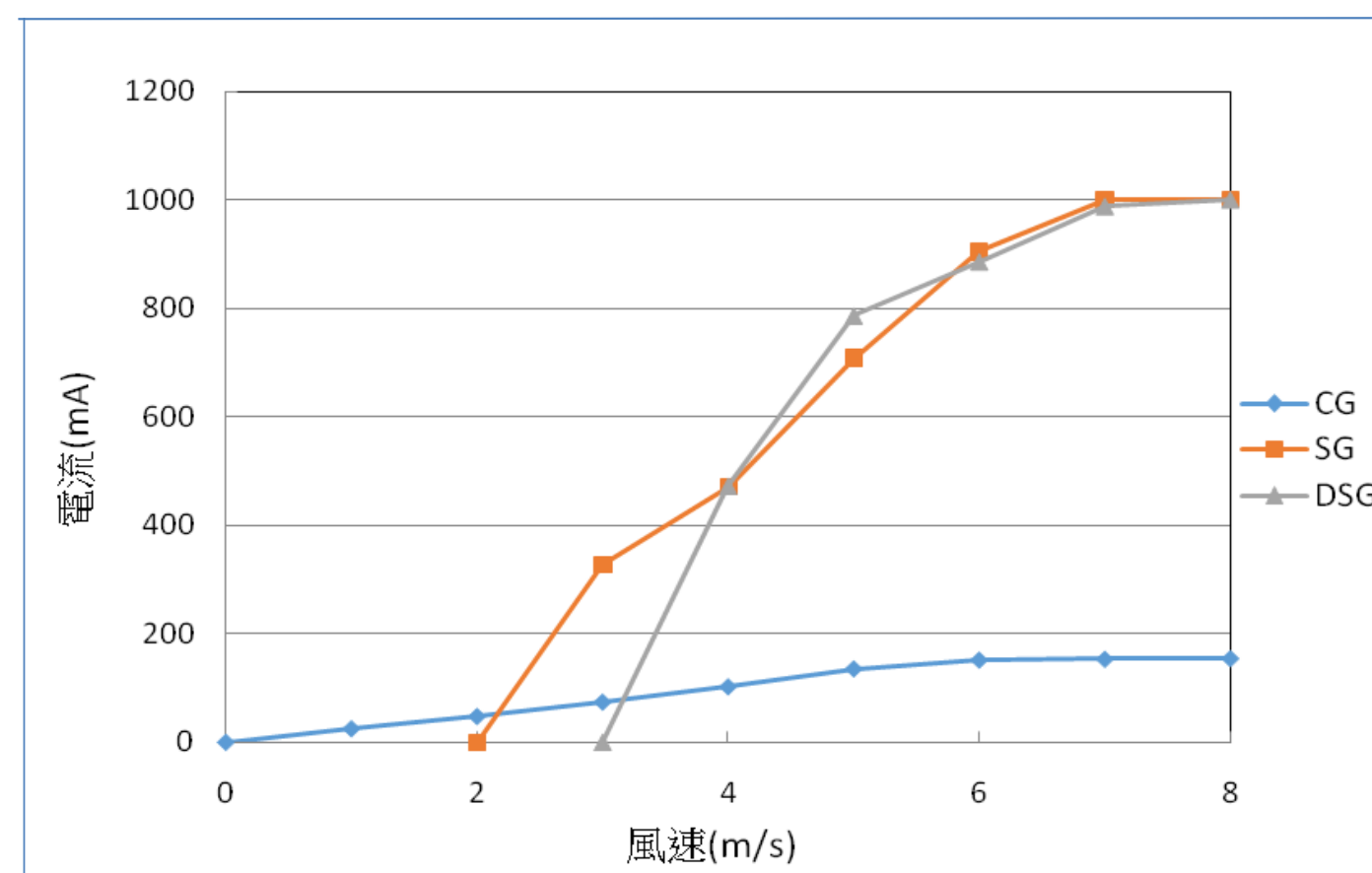


圖5、CG、SG、DSGCGSG發電電壓比較圖 (作者製作)

由整合後之發電電壓數據（圖4）可知，SG與DSG雖具較高啟動初速，但其電壓曲線斜率顯著高於CG，啟動後輸出快速上升，最高可達CG之4.7倍。

電流數據（圖5）亦顯示相同趨勢，SG與DSG在啟動初期即具較高初速，且電流斜率明顯優於CG，展現其卓越之發電效能。

研究二、史坦利效應SRM 同步轉速研究(等速輸入)

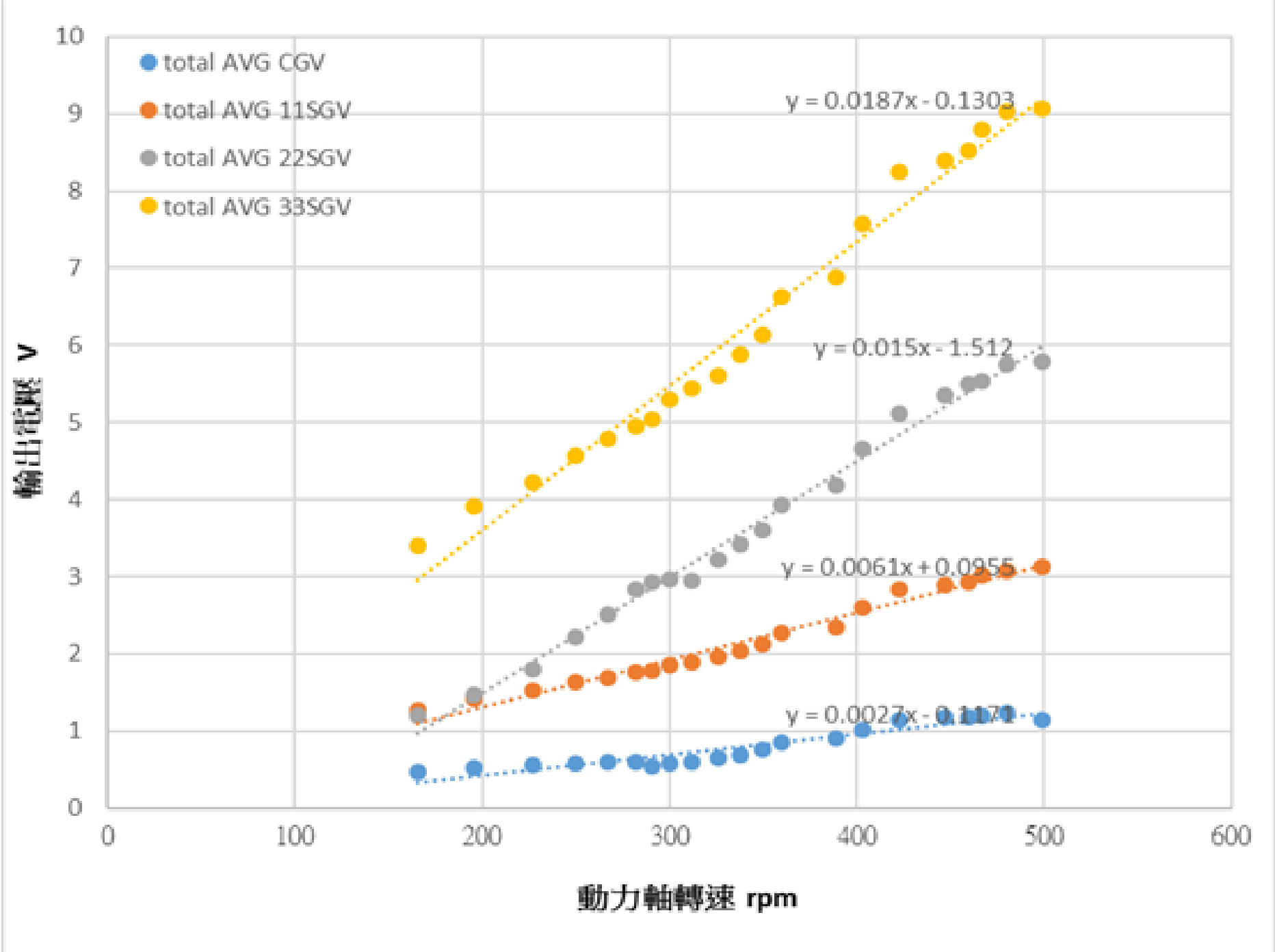


圖4、 同步轉速電壓輸出比較圖 (作者製作)

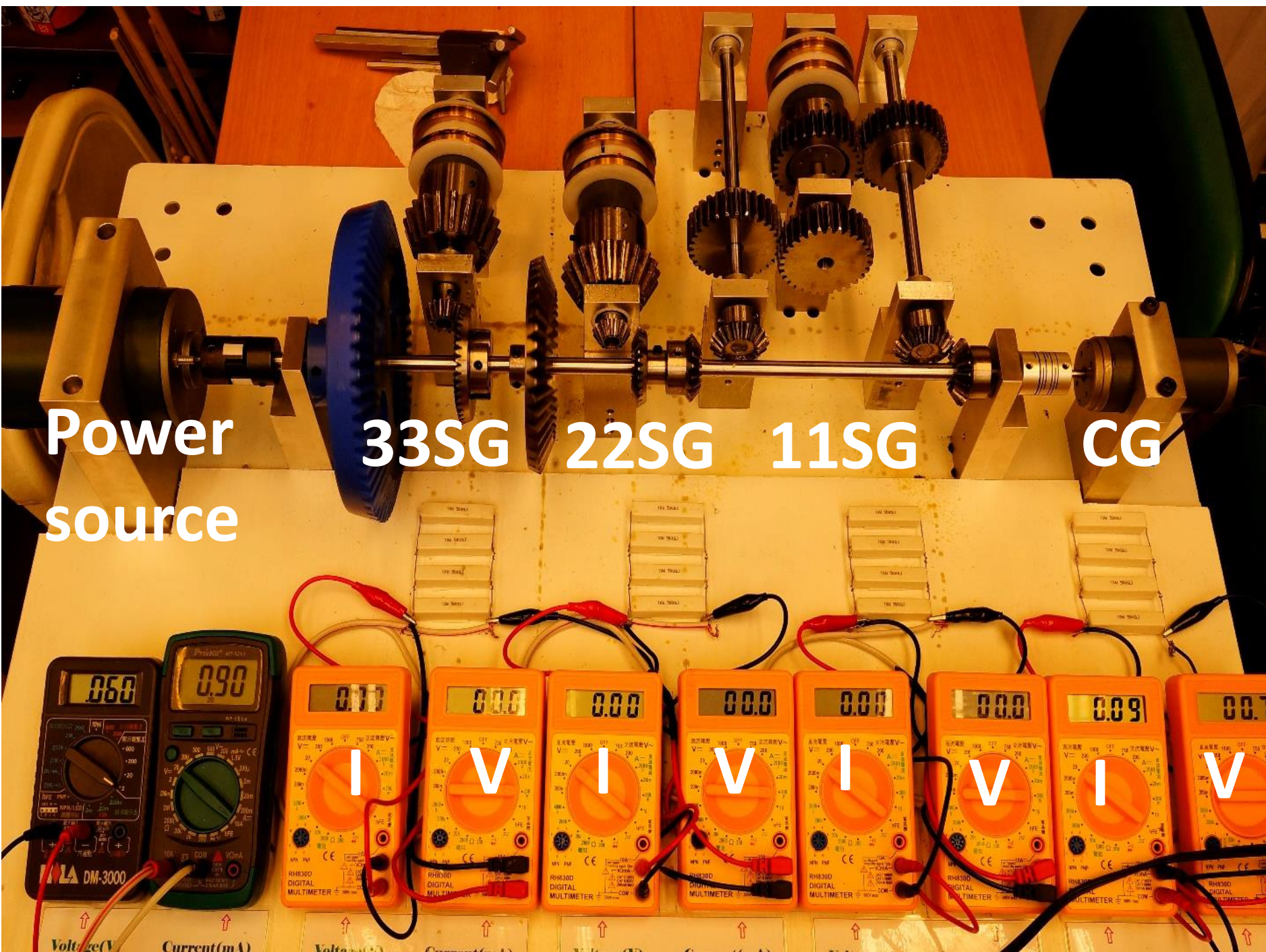


圖5、CG、11SG、22SG、33SG SRM同步轉速發電測試模組 (作者拍攝)

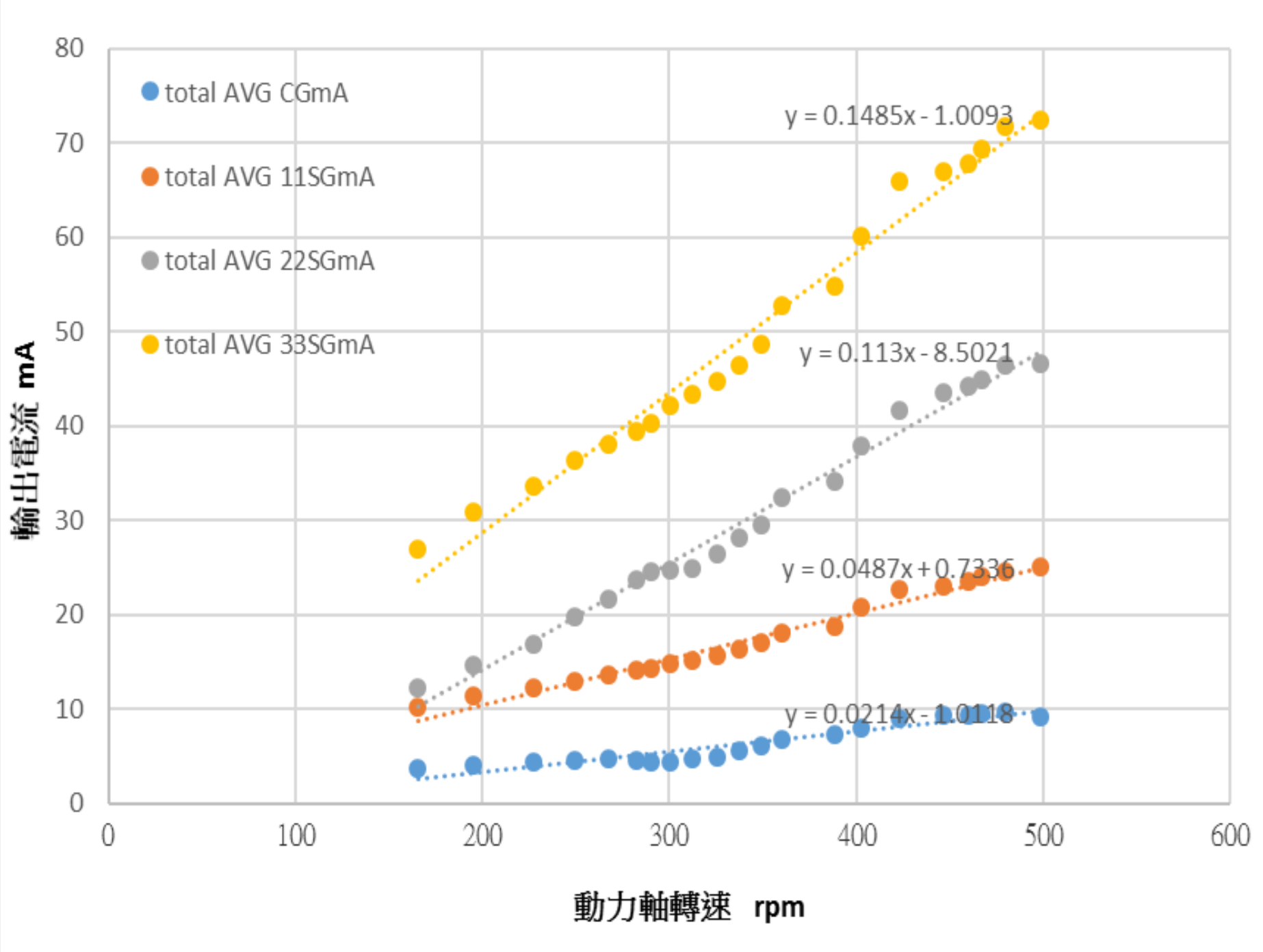


圖6、 同步轉速電流輸出比較圖 (作者製作)

在動力軸轉速相同的條件下進行同步測試(圖5)，結果顯示：發電軸雙轉子間的SR（Slip Rotation）相對轉速越大，其發電電壓曲線斜率亦隨之增加，與CG之差距明顯擴大，顯示其發電效能相對提升（圖4）。

以11SG、22SG與33SG為例，其發電電壓輸出皆顯著優於CG，驗證SR相對轉速對發電效能具正向關聯性（圖6），實驗結果進一步證實，本研究所開發之SG具備卓越之能量轉換效率與發電性能。

討論

討論一、預估相對角速度增加效果

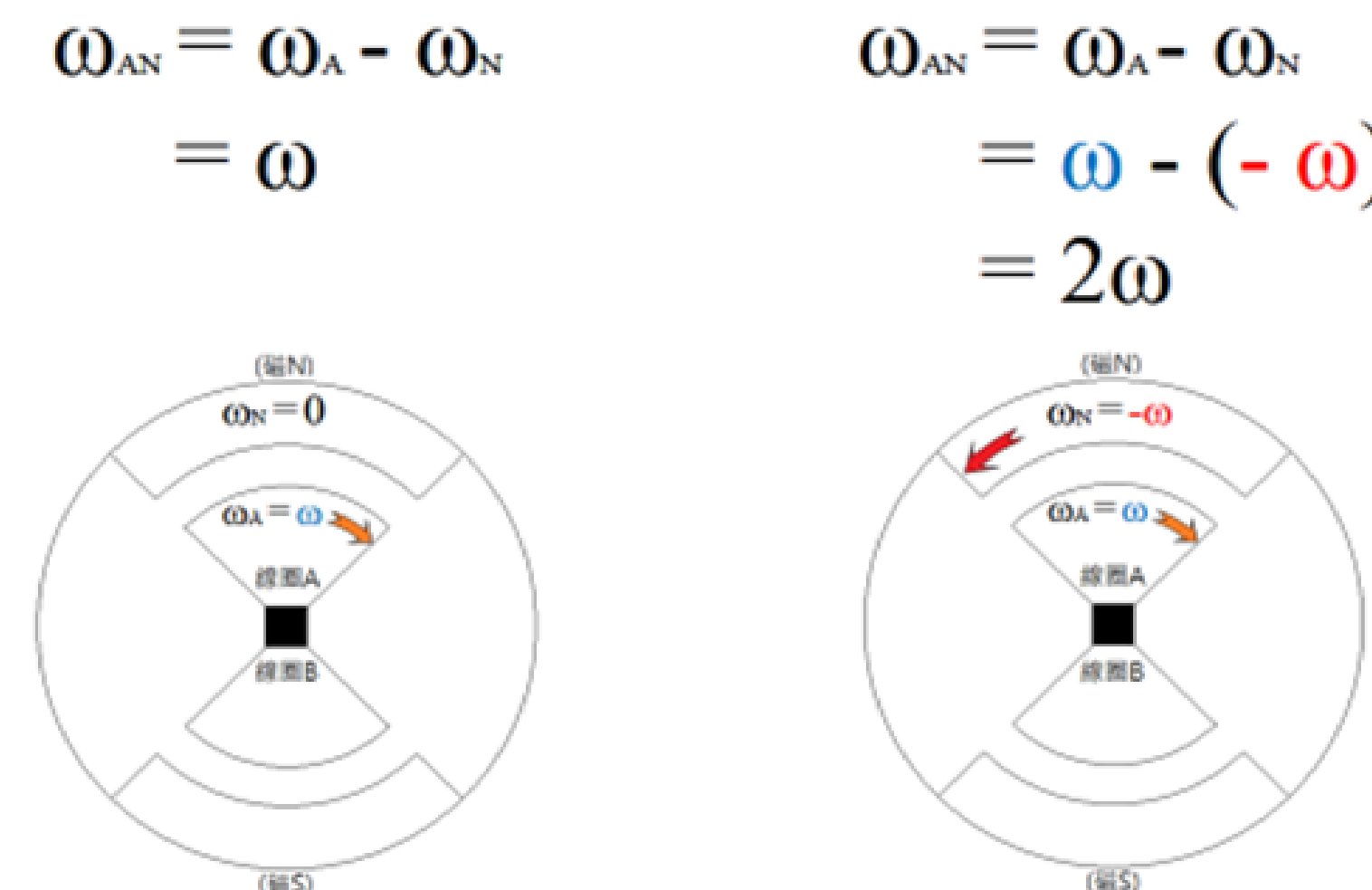


圖7、SRM角速度變化量示意圖 (作者製作)

傳統單轉子發電機僅有轉子轉動，所以轉子的角速度為

$$\omega = \omega - 0 = \omega \quad (\text{圖7})$$

內轉子及外轉子互相反向轉動磁場變化的角速度為

$$\omega = \omega - (-\omega) = 2\omega \quad (\text{圖8})$$

根據法拉第電磁感應定律

$$\epsilon = NBA \omega \sin\theta$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \epsilon' &= NBA 2\omega \sin\theta \\ &= 2 NBA\omega \sin\theta \\ &= 2 \epsilon \end{aligned}$$

SG 的角速度 2ω 為傳統發電機 ω 的 2 倍，理應產生 2ϵ 的效果。

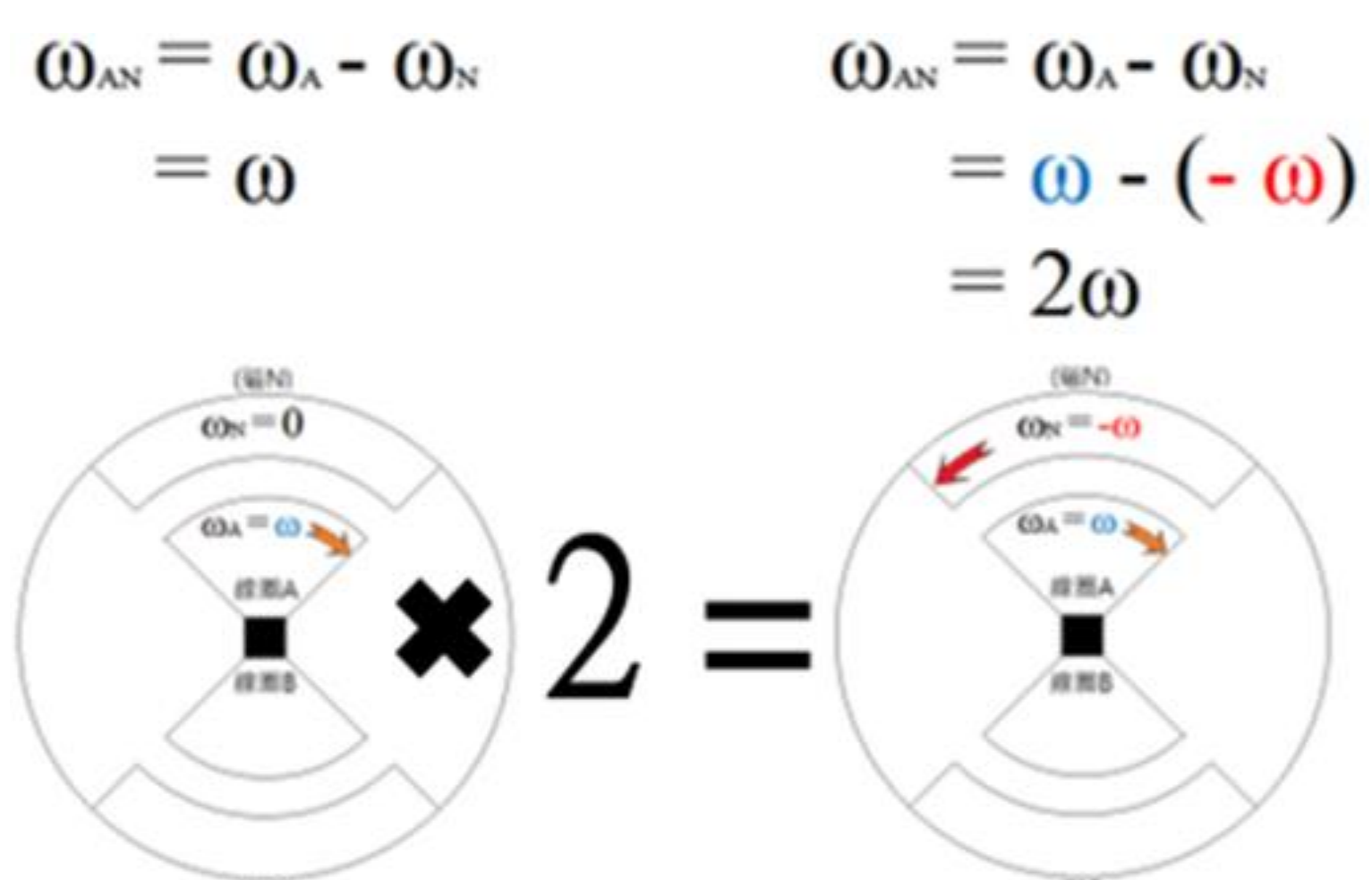


圖8、SRM電動勢預估示意圖 (作者製作)

討論二、發現差異

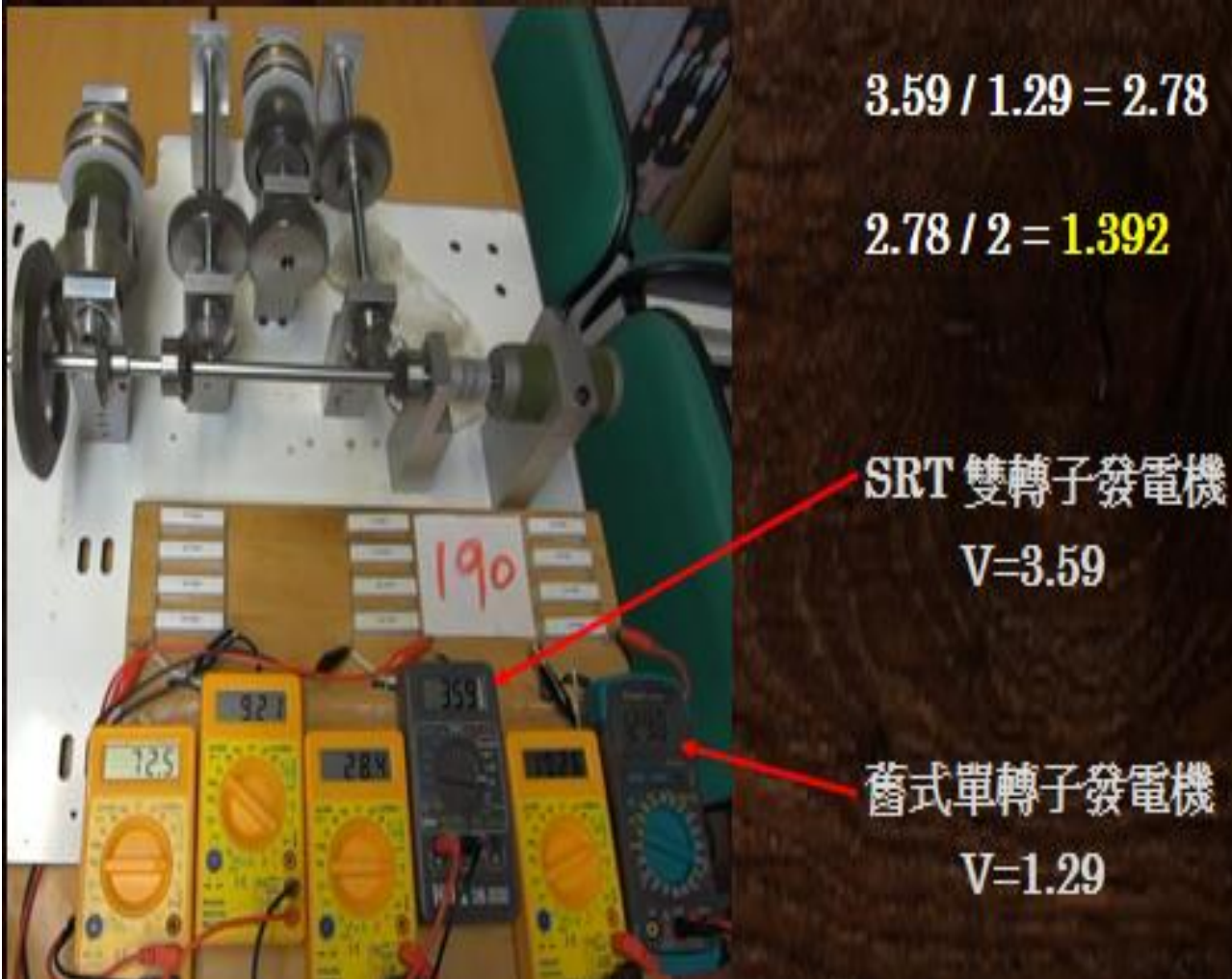


圖9、11SG對CG同步轉速比較實驗 (作者拍攝)

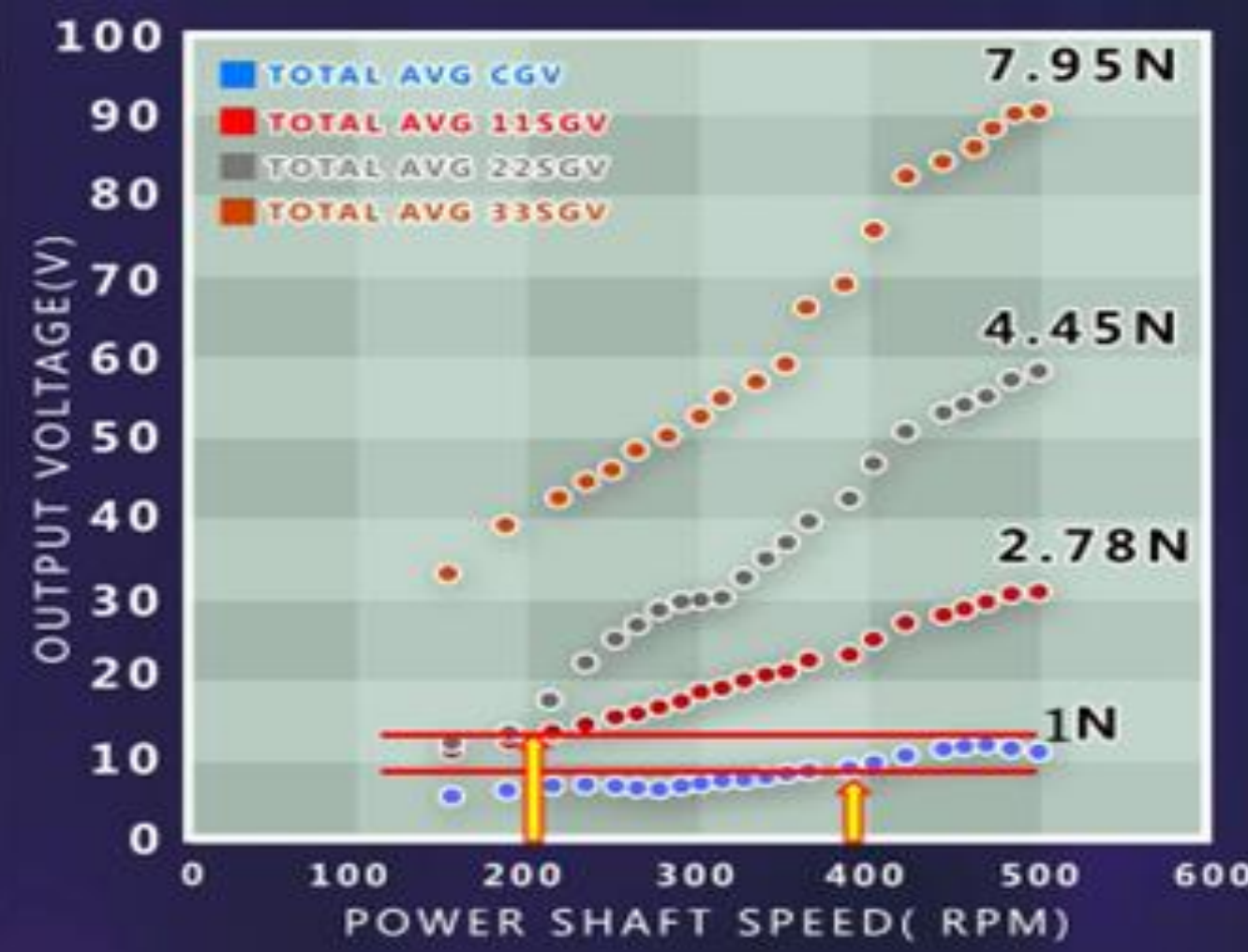


圖10、11SG對比CG 2倍轉速電壓比較圖 (作者製作)

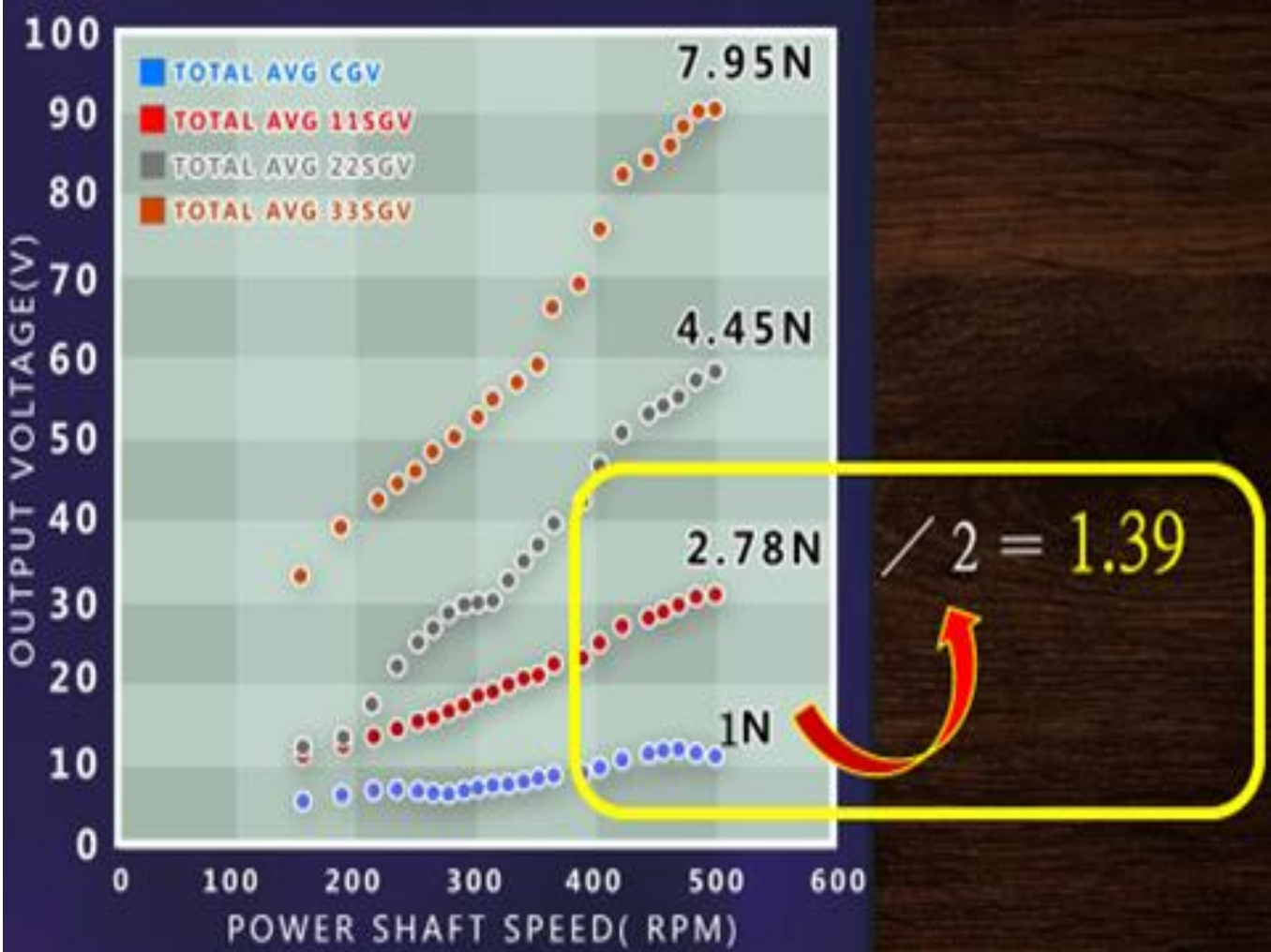


圖11、CG 2倍轉速對比11SG電壓圖 (作者製作)

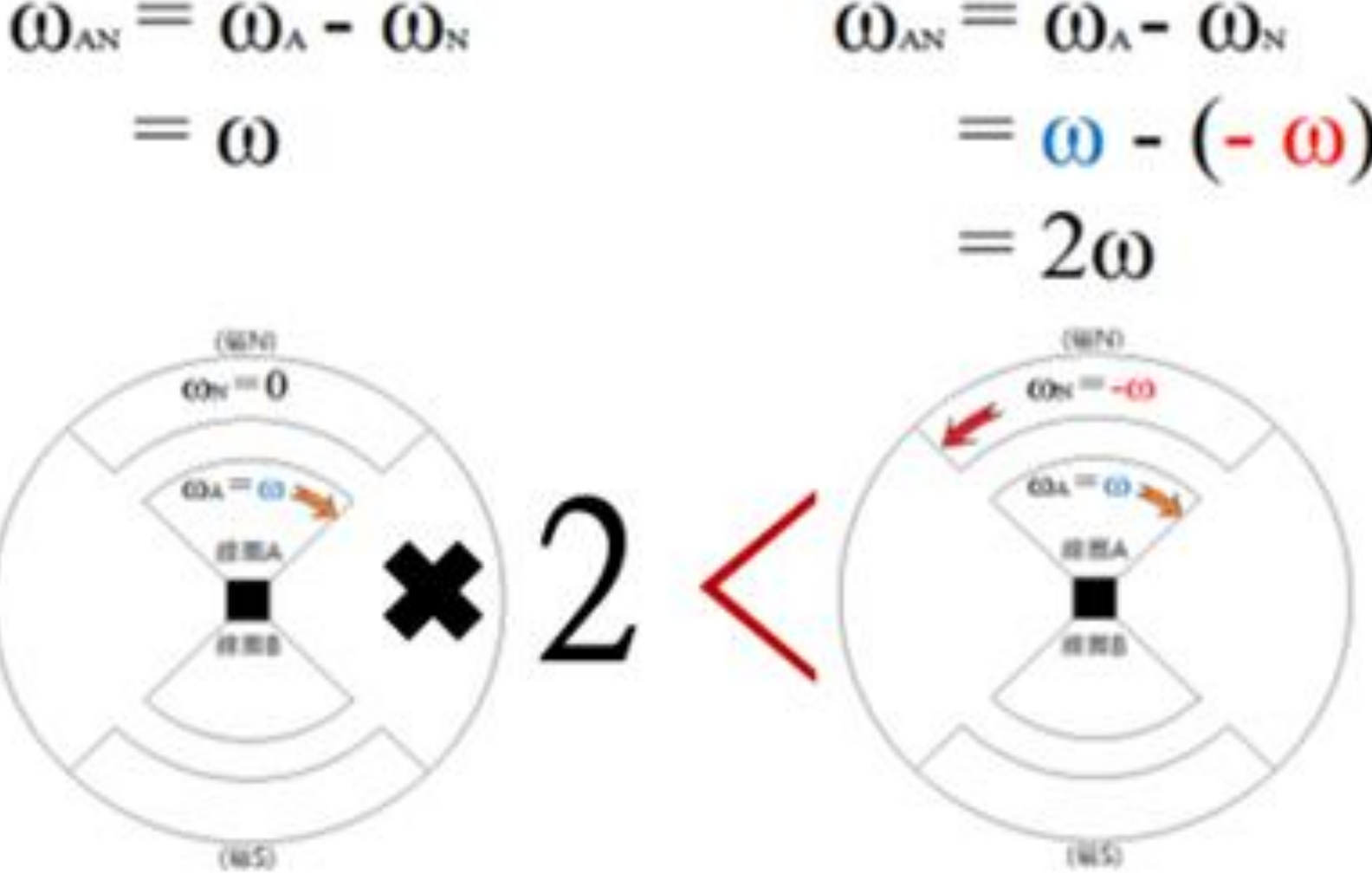


圖12、SRM電動勢預估示意圖 (作者製作)

以11SG電壓對比CG電壓為例，在相同動力軸轉速輸入下，11SG相對角速度為CG的2倍，預估其電動勢亦應為CG的2倍，圖10 實驗數據顯示11SG的電動勢為2.78，大於預估值2倍，2.78是預估值2倍的1.39 倍，

圖10 當CG轉速到達400rpm時，對比SG轉速200rpm，雖然CG轉速已達 SG的2倍，但SG的電動勢確實是大於CG的，圖17、即SG雙轉子n+n的發電量，會大於CG單轉子2n的發電量，圖12 。

討論三、數據分析

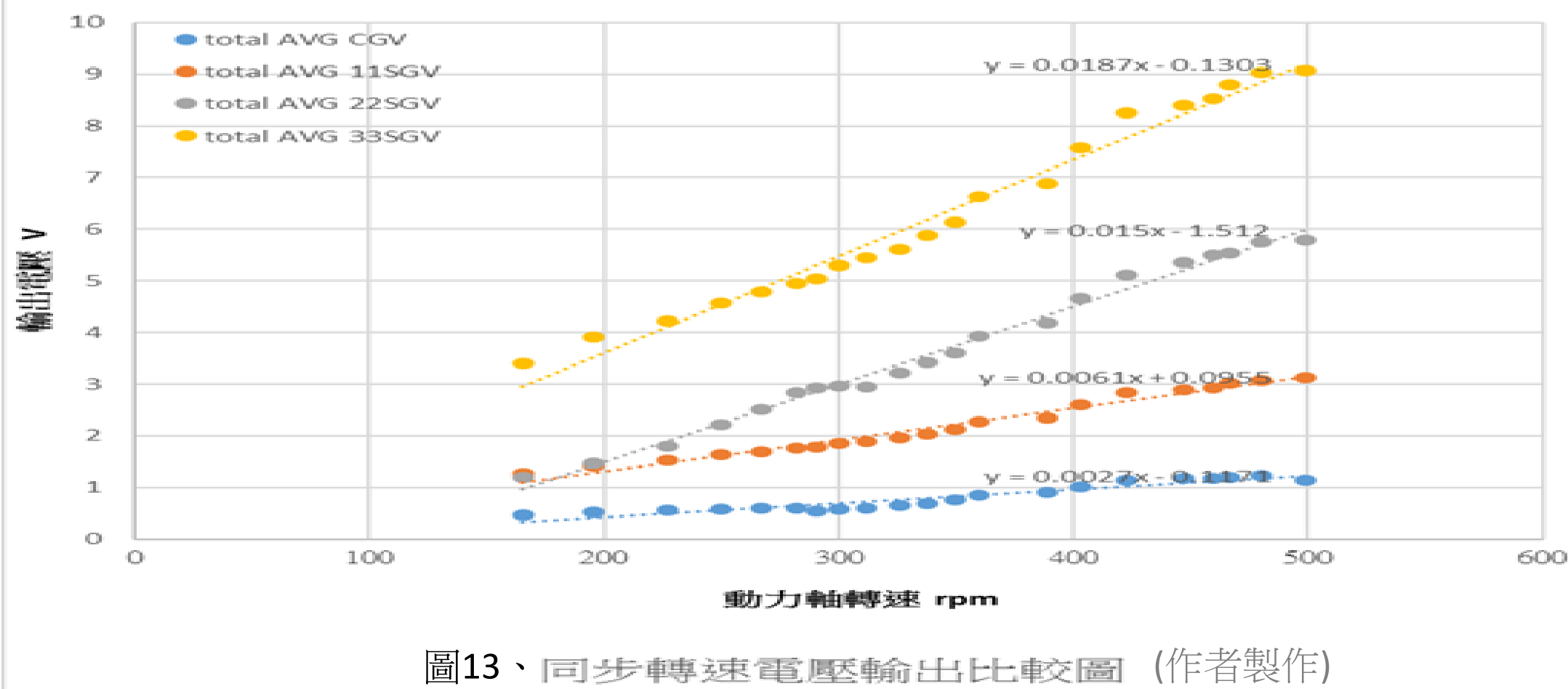


圖13、同步轉速電壓輸出比較圖 (作者製作)

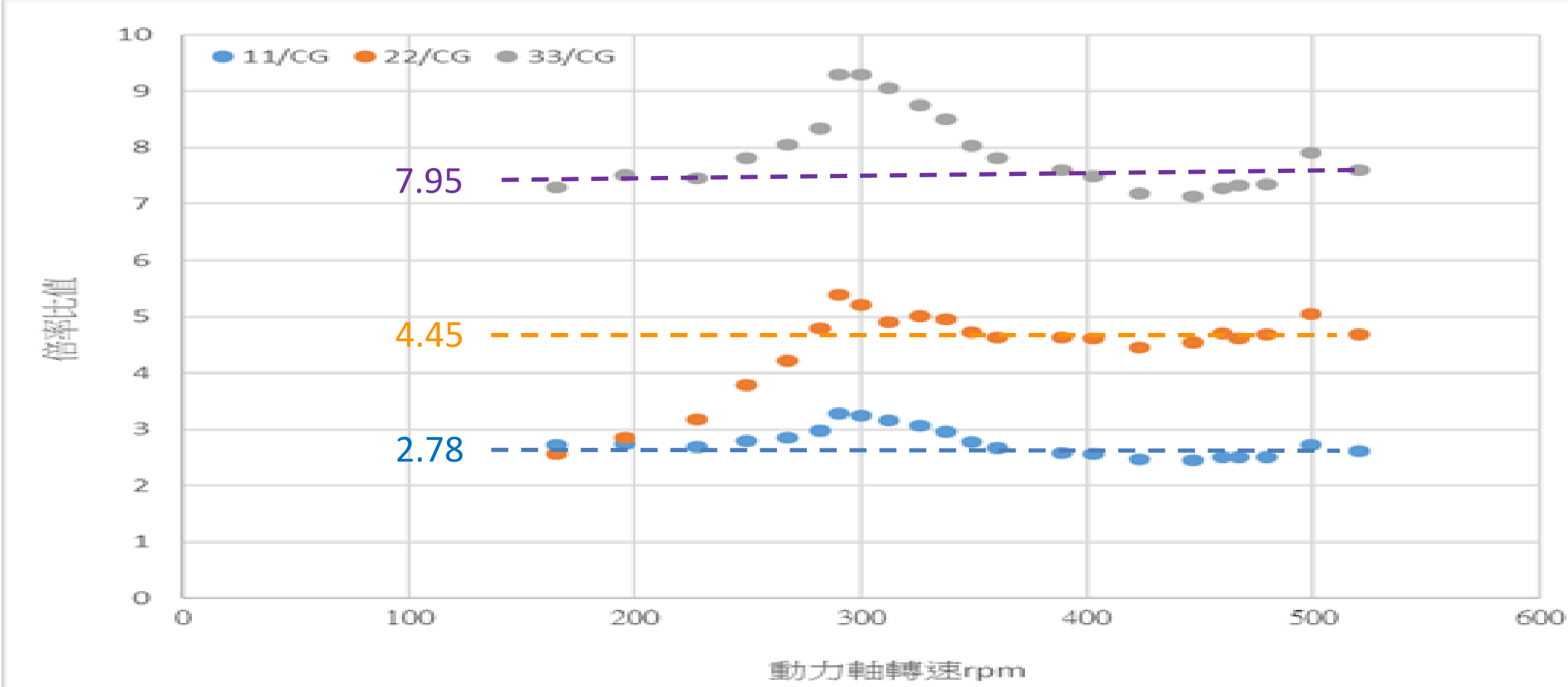


圖14、SG輸出電壓與CG輸出電壓比值圖 (作者製作)

依據FdL，11S、22SG、33SG的預測，輸出電壓與CG的輸出電壓之比值，應為正比，也就是發電電壓曲線斜率應該相同，即各組數據圖形線段應為平行但是實驗數據的圖形所表示的斜率，圖13，就與前述明顯不相符。

在比較不同實驗中電動勢時，依據FdL，11S、22SG、33SG的輸出電壓與CG的輸出電壓之比值，也預估分別等於其角速度倍率的2、4、6倍。與實驗數據不符。

11SG輸出電壓與CG比值，平均值約為 **2.78**，為FdL預估值 **2** 的 **1.39** 倍
22SG輸出電壓與CG比值，平均值約為 **4.45**，為FdL預估值 **4** 的 **1.112** 倍
33SG輸出電壓與CG比值，平均值約為 **7.95**，為FdL預估值 **6** 的 **1.325** 倍

發電線圈轉子與磁場轉子發生相對反向旋轉運動(SR)時，會比單純只有單一轉子絕對運動時，多產生 **11% ~ 40%** 的電壓，圖14

討論四、史坦利效應數學模型建立

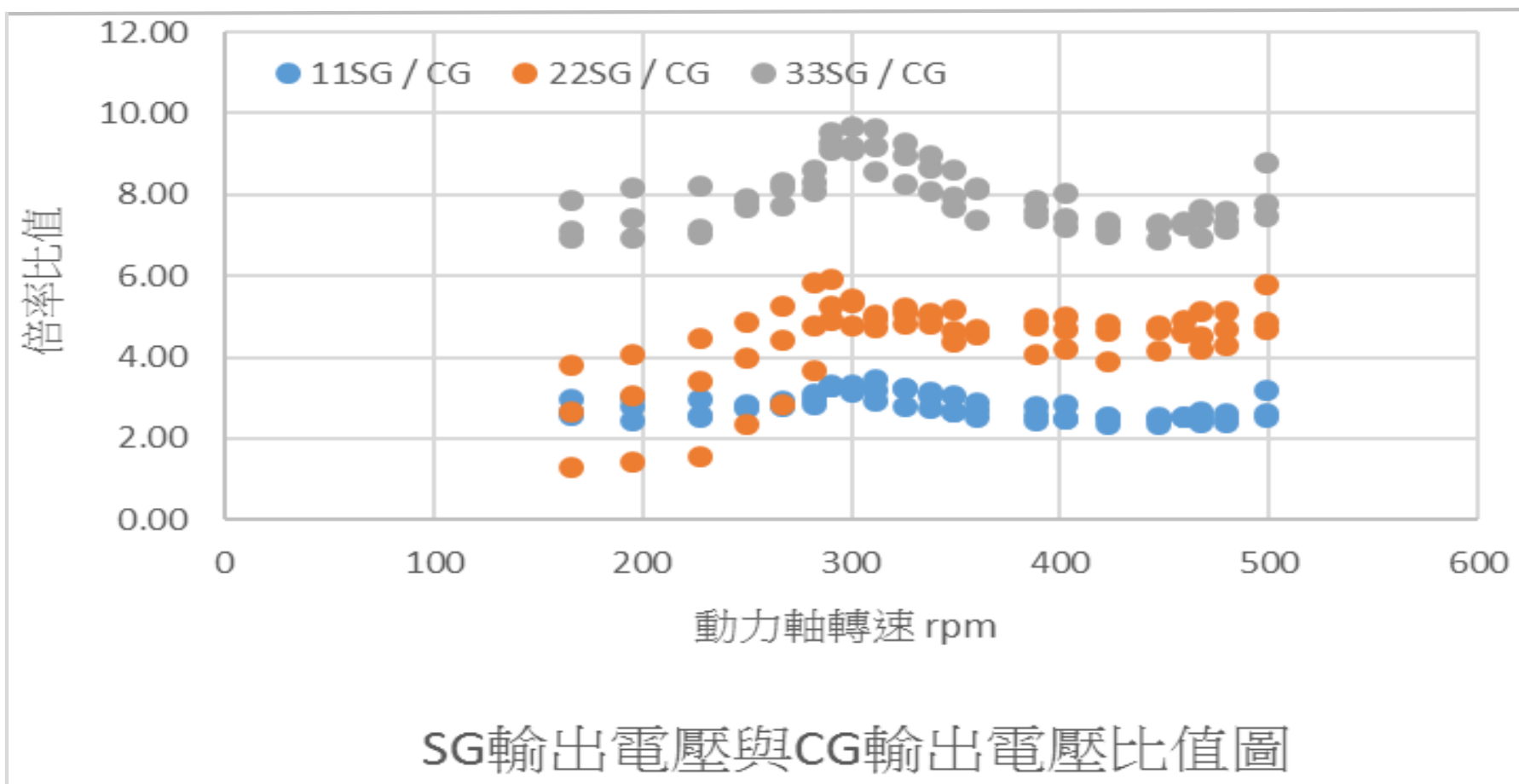


圖15、SG輸出電壓與CG輸出電壓比值原始資料分布圖(作者製作)

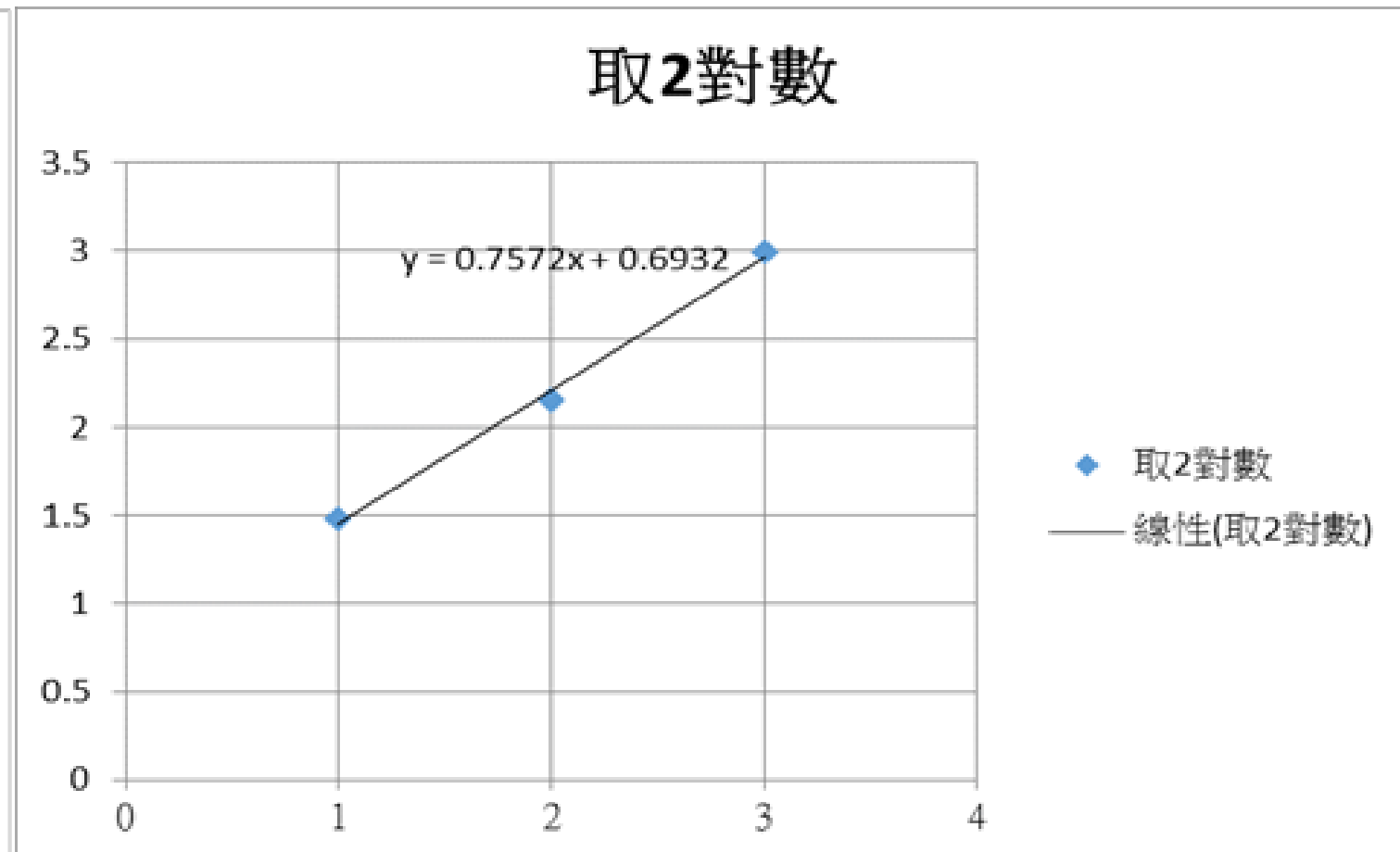


圖16、SG與CG輸出電壓比值原始資料2對數圖(作者製作)

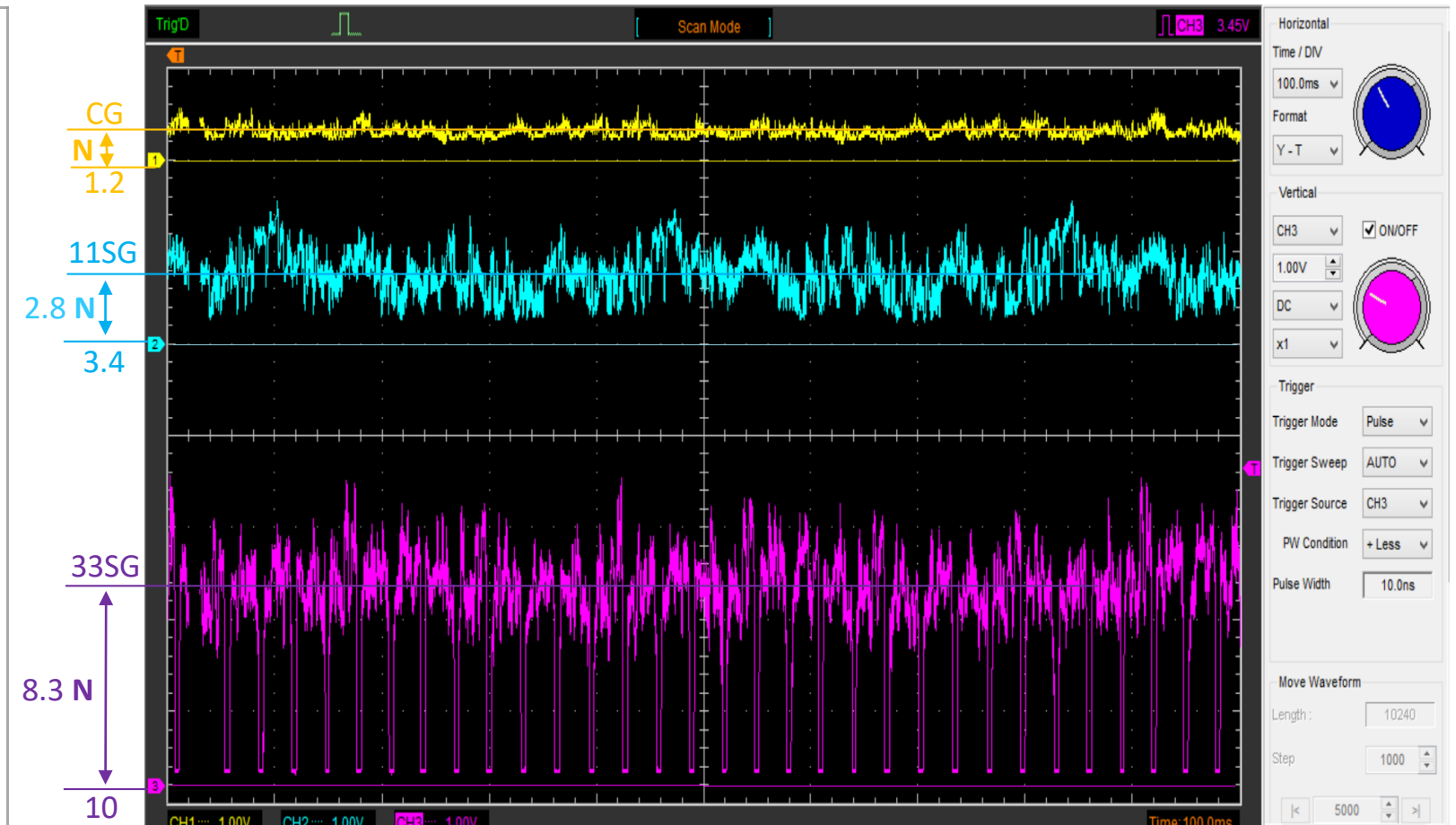


圖17、CG、11SG、33SG輸出 電壓示波器波形圖(作者製作)

將同一實驗中所有原始實驗資料以分布圖呈現，發現分布圖中各數據皆呈現一密集且平行的關係，顯示11SG、22SG、33SG的輸出電壓 分別與CG的輸出電壓之比值，皆為一定值，圖15

接著數據分析11SG/CG，22SG/CG，33SG/CG的電壓比值，分別用以常用對數10 為底及以2為底，進行二進制對數分析再以電腦進行曲線擬合分析，試圖找出 數學關係式，此時意外發現呈現出固定斜率的線性函數，如圖16，進行更深入的數值分析：

當 11SG 電壓與CG電壓的比值，平均約為 2.78 ，可轉換成 $2^{(6/4)}$ $\Rightarrow (3/4)*(2)$ $(3/4)*(1+1)$
當 22SG 電壓與CG電壓的比值，平均約為 4.45 ，可轉換成 $2^{(9/4)}$ $(3/4)*(3)$ $(3/4)*(1+2)$
當 33SG 電壓與CG電壓的比值，平均約為 7.95 ，可轉換成 $2^{(12/4)}$ $(3/4)*(4)$ $(3/4)*(1+3)$
是以 2 為底，以轉子轉速為 $n \omega$ ，指數呈 $3/4$ 等差的數學關係。

SR 的雙轉子系統的發電效能，會隨著內外轉子相對轉速的增加，呈現額外以2為底而指數 $3/4$ 倍率的增加，而非僅僅單純的正反轉速相加。**SR** 讓雙轉子發電機產生 $2^{[(3/4) * (n+1)]}$ 倍的電動勢增加。

討論五、力學討論



CG單轉子轉動能分析：

11SG雙轉子轉動能分析：

22SG雙轉子轉動能分析：

33SG雙轉子轉動能分析：

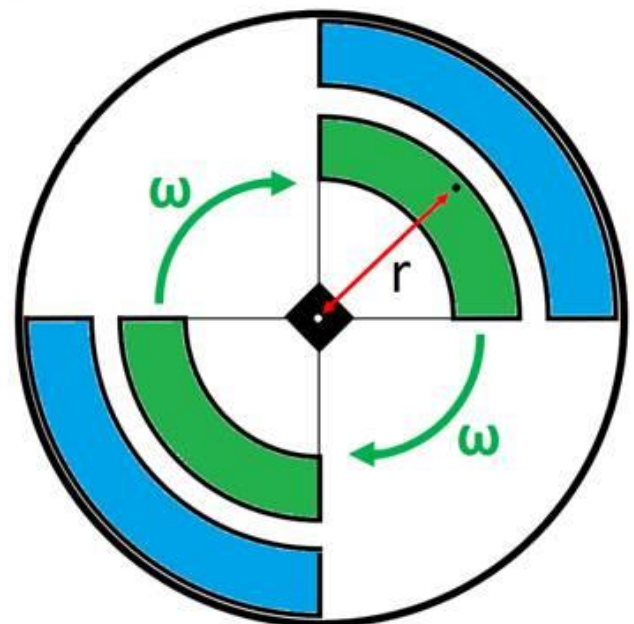


圖18、單轉子轉動示意圖(作者製作)

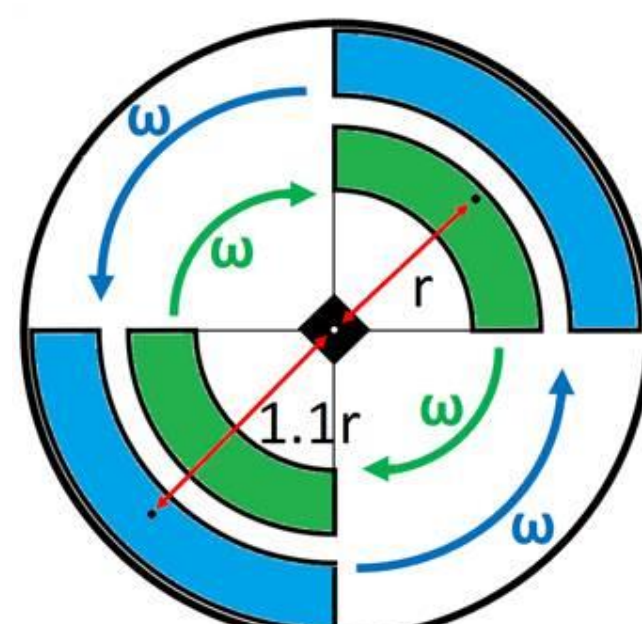


圖19、11SG雙轉子轉動示意圖(作者製作)

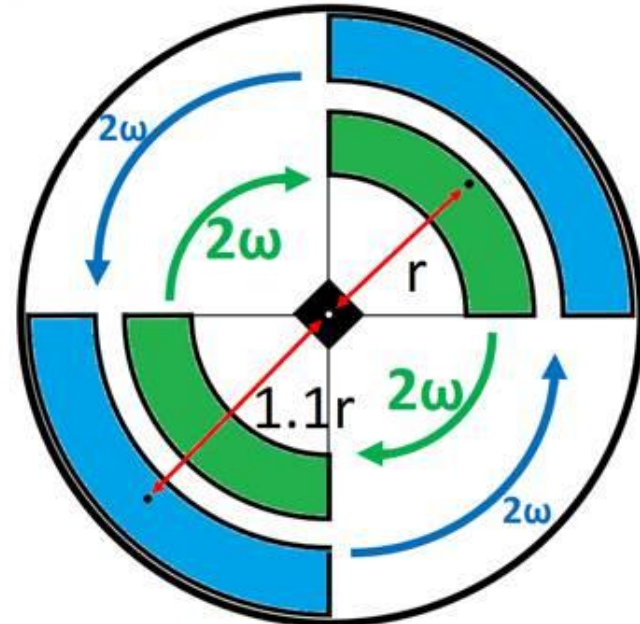


圖20、22SG雙轉子轉動示意圖(作者製作)

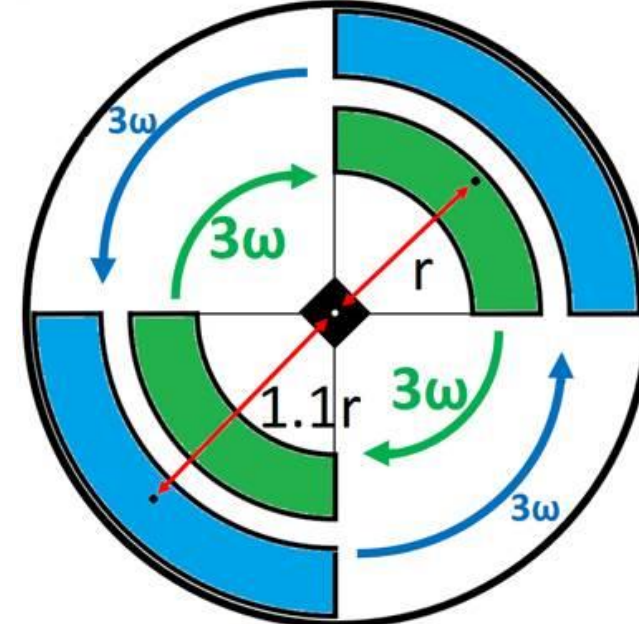


圖21、33SG雙轉子轉動示意圖(作者製作)

$$E_{k,rotation} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

CG單轉子單向 ω 之轉動能
總Ek = 內轉子Ek
= $(0.5) * m * r^2 * \omega^2$

11SG雙轉子反向 ω 之轉動能
總Ek = 內轉子Ek + 外轉子Ek
= $(1.1) * m * r^2 * \omega^2$
雙轉子轉動能與單轉子轉動能
比值 = $(2.2) * (1/2) * m * r^2 * \omega^2$
雙轉子電動勢與單轉子電動勢
比值 = $\sqrt{2.2} = 1.48$

22SG雙轉子反向 2ω 之轉動能
總Ek = 內轉子Ek + 外轉子Ek
= $(4.4) * m * r^2 * \omega^2$
雙轉子轉動能與單轉子轉動能
比值 = $(8.8) * (1/2) * m * r^2 * \omega^2$
雙轉子電動勢與單轉子電動勢
比值 = $\sqrt{8.8} = 2.96$

33SG雙轉子反向 3ω 之轉動能
總Ek = 內轉子Ek + 外轉子Ek
= $(9.9) * m * r^2 * \omega^2$
雙轉子轉動能與單轉子轉動能
比值 = $(19.8) * (1/2) * m * r^2 * \omega^2$
雙轉子電動勢與單轉子電動勢
比值 = $\sqrt{19.8} = 4.45$

雙轉子發電機模組化設計與應用

雙轉子反轉式發電機 對應適用需求場景 優勢特點

- 發電效率大幅提升
 - 機構空間大幅縮減
 - 設備重量大幅減輕
 - 模組化擴充組合
- 對應需求
- 有快速大幅供電需求
 - 空間不足狹小
 - 有載重限制
 - 有輕量化需求
 - 有彈性擴充需求
- 一般發電、移動載具
- 增程式電動車
 - 柴電潛艇

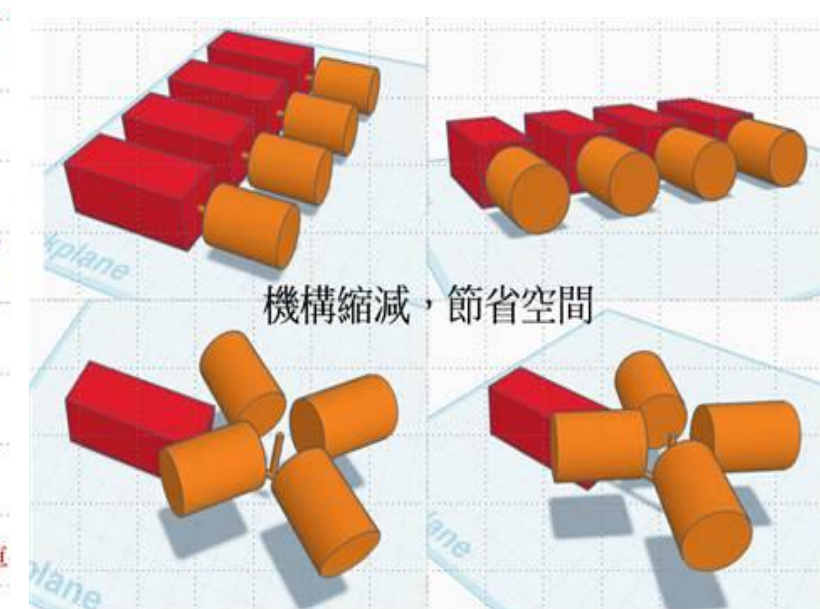


圖22、雙轉子適用場景(作者製作)

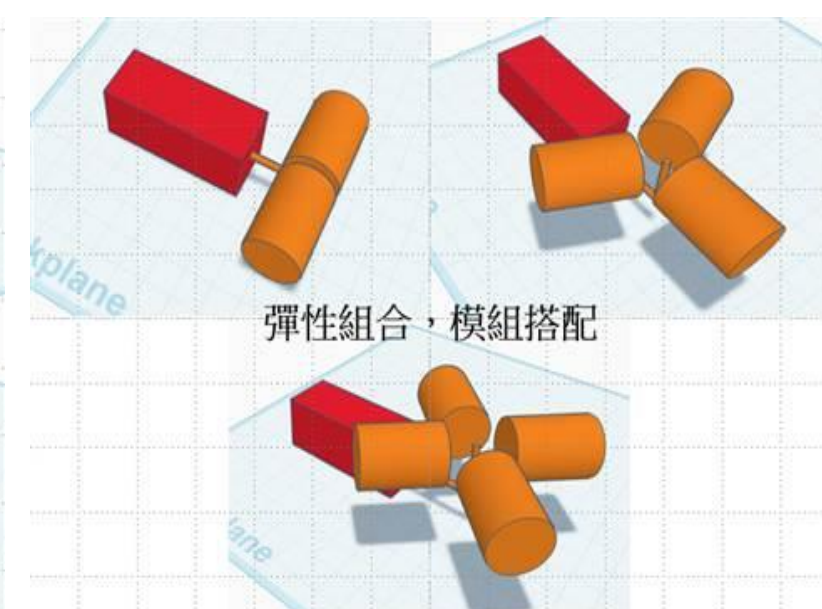


圖23、機構比較(作者製作)

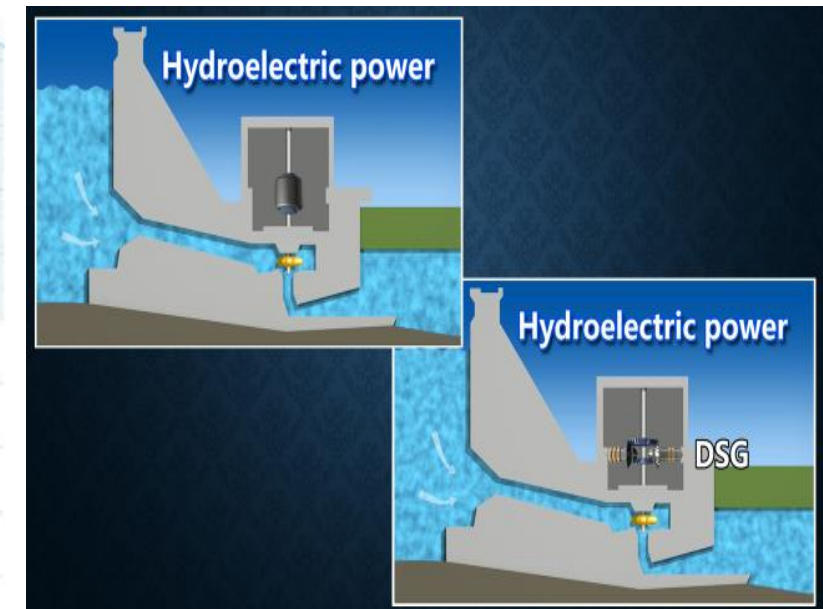


圖24、雙轉子模組化(作者製作)

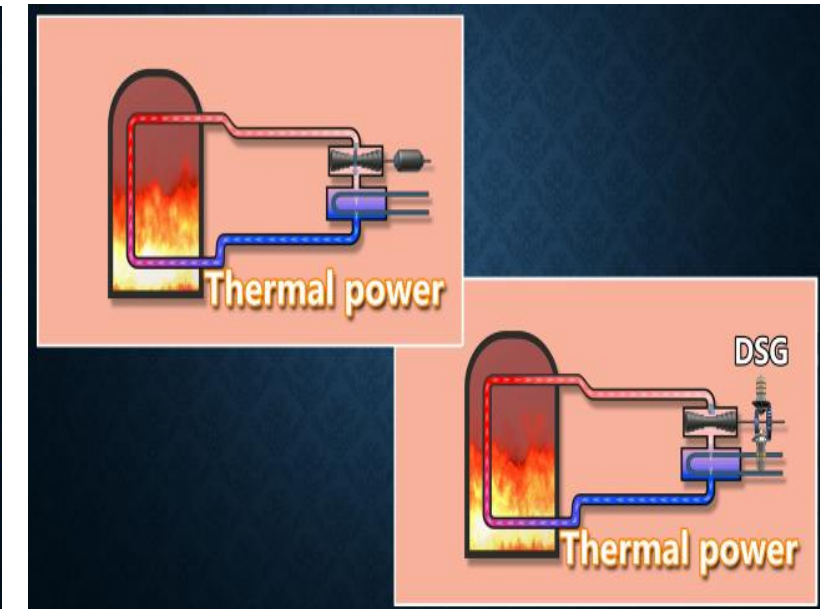


圖25、雙轉子水力替換(作者製作)

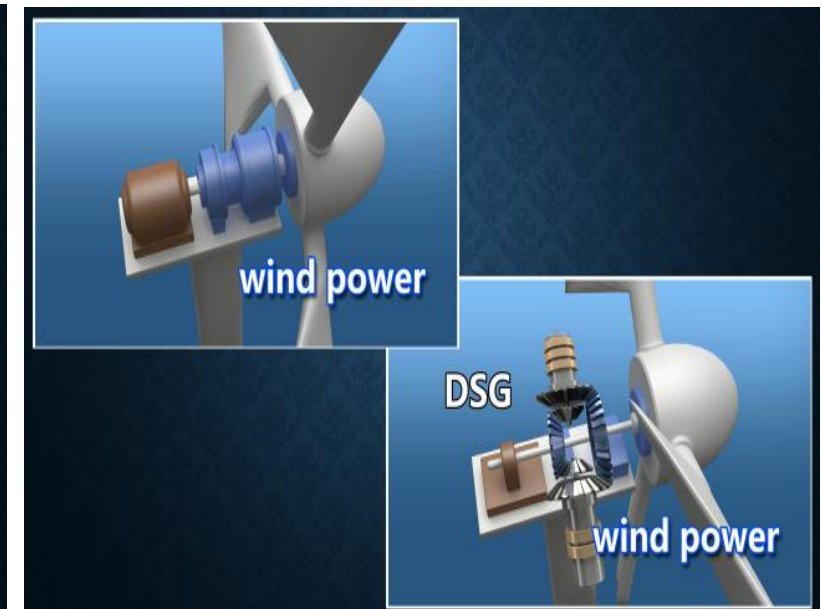


圖26、雙轉子火力替換(作者製作)



圖27、雙轉子風力替換(作者製作)

雙轉子發電機（SRM）相較於傳統單轉子架構，發電效能展現顯著優勢，具備高度模組化潛力，設計與應用特點如下：

- 結構空間優化潛力
雙轉子系統採對稱式結構設計，空間利用效率高。
- 模組化與並聯擴展能力
雙轉子結構可模組化與並聯擴展配置，顯著降低機構零件數與安裝空間需求（如圖23下、圖24）。簡化系統維護，提升整合與部署效率。
- 適用於空間受限之移動平台
結構緊湊與配置彈性，特別適合應用於如柴電潛艦、增程式電動車等空間受限之移動載具（圖29）。
- 利於既有系統升級改造
可直接整合至傳統發電系統中，具備良好之結構與驅動軸相容性，無需大幅改裝即可顯著提升發電效率(圖25)

結論

- 傳統單轉子發電機在未配置齒輪增速裝置的情況下，其能源轉換效率僅為雙轉子發電機的約 **13% 至 36%**，顯示於低速驅動條件下之效能顯著受限。
- 所提出之 SG 雙轉子發電系統透過「Stanley's Rotation」結構導入內外轉子相對反向旋轉機制，能有效提升系統角速度，並藉由指數倍率模型 $2^{[(3/4) * (n+1)]}$ 強化電能產出，突破傳統單轉子發電機對電壓增幅之限制。
- SG 模組具備高度模組化與擴充性，可依實際電力需求靈活轉換為高輸出版本之 DSG 模組，進一步擴展整體系統發電容量，提升應用彈性。
- SRM 結構下的雙轉子發電機，其電動勢之產生行為，經實驗驗證可由本研究所建立之 Stanley Effect 數學模型準確描述：

$$\varepsilon = N * B * A * \sin\theta * \omega * 2^{[(\frac{3}{4}) * (n+1)]}$$